

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-205181

(43)Date of publication of application : 23.07.2002

(51)Int.Cl.

B23K 26/00
B23K 26/02
B23K 26/04
B23K 26/06
C03B 33/08

(21)Application number : 2001-278665

(71)Applicant : HAMAMATSU PHOTONICS KK

(22)Date of filing : 13.09.2001

(72)Inventor : FUKUYO FUMITSUGU

FUKUMITSU KENJI

UCHIYAMA NAOKI

WAKUTA TOSHIMITSU

(30)Priority

Priority number : 2000278306 Priority date : 13.09.2000 Priority country : JP

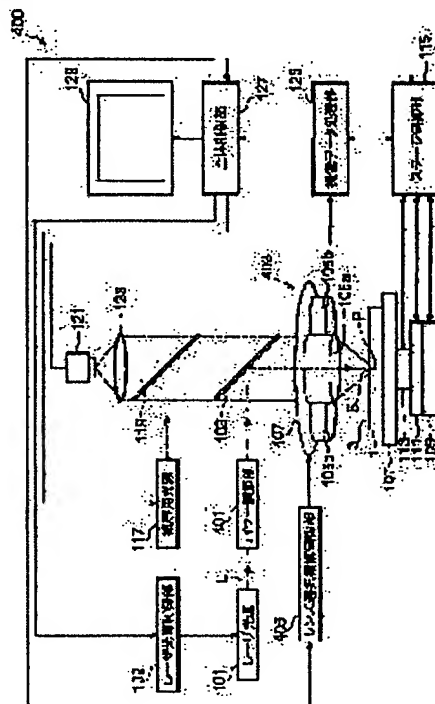
(54) DEVICE AND METHOD FOR LASER BEAM MACHINING

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a device for laser beam machining with which a work to be machined is precisely cut without a molten part or a crack which is deviated from a planned cutting line on the surface of the work to be machined.

SOLUTION: The device is provided with a laser beam source 101 which emits a pulse laser beam of which pulse width is 1 μ s smaller, a power adjustment part 401 which adjusts the magnitude of the power of the pulse laser beam, a lens selection mechanism 403 including a plurality of condenser lenses which condense the pulse laser beam so that the peak power density at the focal point P of the pulse laser beam becomes 1×10^8 (W/cm²) or larger, a Z-axis stage 113 with which the focal point P of the pulse laser beam condensed with the condenser lenses is positioned inside the work 1 to be machined, and an X (Y)-axis stages 109 (111) which relatively moves the focal point P along the planned cutting line 5 of the work 1 to be machined. The

respective aperture numbers of optical system including the condenser lenses 105a to 105c are different from one another. The dimension of a property modification spot formed inside the work 1 to be machined is controlled by adjusting the aperture number and the magnitude of the power of the pulse laser beam. The dimension is displayed prior to the machining with the laser beam.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-205181

(P2002-205181A)

(43) 公開日 平成14年7月23日 (2002.7.23)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テ-マ-ト* (参考)
B 2 3 K 26/00	3 2 0	B 2 3 K 26/00	3 2 0 E 4 E 0 6 8
			M 4 G 0 1 5
			N
26/02		26/02	C
26/04		26/04	C
審査請求 未請求 請求項の数17 O L (全 26 頁) 最終頁に続く			

(21) 出願番号 特願2001-278665 (P2001-278665)

(22) 出願日 平成13年9月13日 (2001.9.13)

(31) 優先権主張番号 特願2000-278306 (P2000-278306)

(32) 優先日 平成12年9月13日 (2000.9.13)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000236436

浜松ホトニクス株式会社

静岡県浜松市市野町1126番地の1

(72) 発明者 福世 文嗣

静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ

トニクス株式会社内

(72) 発明者 福満 憲志

静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ

トニクス株式会社内

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外2名)

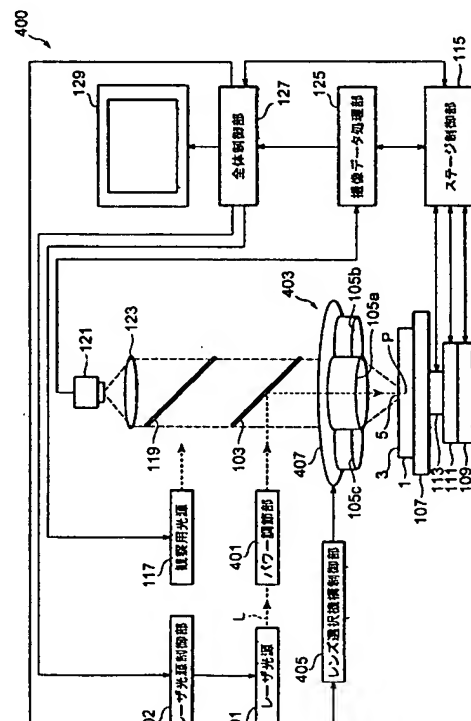
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ加工装置及びレーザ加工方法

(57) 【要約】

【課題】 加工対象物の表面に熔融や切断予定ラインから外れた割れが生じることなく、かつ精密に加工対象物を切断することができるレーザ加工装置を提供すること。

【解決手段】 パルス幅が $1 \mu s$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源101と、パルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節部401と、パルスレーザ光の集光点Pのピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm²) 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含むレンズ選択機構403と、集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点Pを加工対象物1の内部に合わせるZ軸ステージ113と、加工対象物1の切断予定ライン5に沿って集光点Pを相対的に移動させるX (Y) 軸ステージ109 (111) とを備える。集光用レンズ105a~105cを含む光学系の開口数はそれぞれ異なる。開口数やパルスレーザ光のパワーの大きさを調節することにより、加工対象物1の内部に形成される改質スポットの寸法を制御する。寸法はレ



【特許請求の範囲】

【請求項1】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、
 パルスレーザ光のパワー大きさの入力に基づいて前記レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、
 前記レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光手段と、
 前記集光手段により集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、
 前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、
 を備え、
 前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1つの改質スポットが形成され、
 前記パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、
 前記入力されたパルスレーザ光のパワーの大きさに基づいて、この大きさのパワーで形成される改質スポットの寸法を前記相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、
 前記寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法を表示する寸法表示手段と、
 を備える、レーザ加工装置。

【請求項2】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、
 前記レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、
 開口数の大きさの入力に基づいて前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する開口数調節手段と、
 前記集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、
 前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、
 を備え、
 前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1つの改質スポットが形成され、
 前記開口数調節手段により調節される開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、
 前記入力された開口数の大きさに基づいて、この大きさの開口数で形成される改質スポットの寸法を前記相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、

を表示する寸法表示手段と、
 を備える、レーザ加工装置。

【請求項3】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、
 前記レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含みかつ前記複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手段と、
 を備え、
 前記複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開口数が異なり、
 前記レンズ選択手段で選択された集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、
 前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、
 を備え、
 前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1つの改質スポットが形成され、
 前記複数の集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、
 選択された前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさに基づいて、この大きさの開口数で形成される改質スポットの寸法を前記相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、
 前記寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法を表示する寸法表示手段と、
 を備える、レーザ加工装置。

【請求項4】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、
 パルスレーザ光のパワー大きさの入力に基づいて前記レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、
 前記レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、
 開口数の大きさの入力に基づいて前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する開口数調節手段と、
 前記集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、
 前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、
 を備え、
 前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1

前記パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光の
パワーの大きさ及び前記開口数調節手段により調節され
る開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関
係を予め記憶した相関関係記憶手段と、
前記入力されたパルスレーザ光のパワーの大きさに及び
前記入力された開口数の大きさに基づいてこれらの大き
さで形成される改質スポットの寸法を前記相関関係記憶
手段から選択する寸法選択手段と、
前記寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法
を表示する寸法表示手段と、
を備える、レーザ加工装置。

【請求項5】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光
を射出するレーザ光源と、
パルスレーザ光のパワー大きさに基づいて前記レー
ザ光源から射出されるパルスレーザ光のパワーの大き
さを調節するパワー調節手段と、
前記レーザ光源から射出されたパルスレーザ光の集光点
のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるよ
うにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含み
かつ前記複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手
段と、
を備え、
前記複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開口数
が異なり、
前記レンズ選択手段で選択された前記集光用レンズによ
り集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内
部に合わせる手段と、
前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレー
ザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、
を備え、
前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光
を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1
つの改質スポットが形成され、
前記パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光の
パワーの大きさ及び前記複数の集光用レンズを含む光学
系の開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関
関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、
前記入力されたパルスレーザ光のパワーの大きさに及び
選択された前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大
きさに基づいて、これらの大きさに形成される改質スポ
ットの寸法を前記相関関係記憶手段から選択する寸法選
択手段と、
前記寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法
を表示する寸法表示手段と、
を備える、レーザ加工装置。

【請求項6】 前記寸法選択手段で選択された寸法の改
質スポットの画像を作成する画像作成手段と、
前記画像作成手段により作成された画像を表示する画像
表示手段と、

装置。

【請求項7】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光
を射出するレーザ光源と、
前記レーザ光源から射出されるパルスレーザ光のパワー
の大きさを調節するパワー調節手段と、
前記レーザ光源から射出されたパルスレーザ光の集光点
のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるよ
うにパルスレーザ光を集光する集光手段と、
前記集光手段により集光されたパルスレーザ光の集光点
10 を加工対象物の内部に合わせる手段と、
前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレー
ザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、
を備え、
前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光
を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1
つの改質スポットが形成され、
前記パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光の
パワーの大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予
め記憶した相関関係記憶手段と、
20 改質スポットの寸法の入力に基づいて、この寸法に形成
できるパルスレーザ光のパワーの大きさを前記相関関係
記憶手段から選択するパワー選択手段と、
を備え、
前記パワー調節手段は、前記パワー選択手段により選択
されたパワーの大きさとなるように前記レーザ光源から
射出されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節す
る、レーザ加工装置。

【請求項8】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光
を射出するレーザ光源と、
30 前記レーザ光源から射出されたパルスレーザ光の集光点
のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるよ
うにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、
前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節
する開口数調節手段と、
前記集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集
光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、
前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレー
ザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、
を備え、
40 前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光
を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1
つの改質スポットが形成され、
前記開口数調節手段により調節される開口数の大きさと
改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関
係記憶手段と、
改質スポットの寸法の入力に基づいて、この寸法に形成
できる開口数の大きさを前記相関関係記憶手段から選択
する開口数選択手段と、
を備え、

された開口数の大きさとなるように前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する、レーザ加工装置。

【請求項9】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、

前記レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含むかつ前記複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手段と、

を備え、

前記複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開口数が異なり、

前記レンズ選択手段で選択された前記集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、

前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、

を備え、

前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1つの改質スポットが形成され、

前記複数の集光用レンズの開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、

改質スポットの寸法の入力に基づいて、この寸法に形成できる開口数の大きさを前記相関関係記憶手段から選択する開口数選択手段と、

を備え、

前記レンズ選択手段は、前記開口数選択手段により選択された開口数の大きさとなるように前記複数の集光用レンズの選択をする、レーザ加工装置。

【請求項10】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、

前記レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、

前記レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、

前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する開口数調節手段と、

前記集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、

前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、

を備え、

前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1つの改質スポットが形成され、

パワーの大きさ及び前記開口数調節手段により調節される開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、

改質スポットの寸法の入力に基づいて、この寸法に形成できるパワー及び開口数の大きさの組を前記相関関係記憶手段から選択する組選択手段と、

を備え、

前記パワー調節手段及び前記開口数調節手段は、前記組選択手段により選択されたパワー及び開口数の大きさとなるように前記レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び前記集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する、レーザ加工装置。

【請求項11】 パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、

前記レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、

前記レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含むかつ前記複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手段と、

を備え、

前記複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開口数が異なり、

前記レンズ選択手段で選択された前記集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、

前記加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、

を備え、

前記内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を前記加工対象物に照射することにより、前記内部に1つの改質スポットが形成され、

前記パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び前記複数の集光用レンズの開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、

改質スポットの寸法の入力に基づいて、この寸法に形成できるパワー及び開口数の大きさの組を前記相関関係記憶手段から選択する組選択手段と、

を備え、

前記パワー調節手段及び前記レンズ選択手段は、前記組選択手段により選択されたパワー及び開口数の大きさとなるように前記レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさの調節及び前記複数の集光用レンズの選択をする、レーザ加工装置。

【請求項12】 前記パワー選択手段により選択されたパワーの大きさを表示する表示手段を備える、請求項7記載のレーザ加工装置。

開口数の大きさを表示する表示手段を備える、請求項8又は9記載のレーザ加工装置。

【請求項14】 前記組選択手段により選択された組のパワーの大きさ及び開口数の大きさを表示する表示手段を備える、請求項10又は11記載のレーザ加工装置。

【請求項15】 前記切断予定ラインに沿って前記加工対象物の前記内部に形成された複数の前記改質スポットにより改質領域が規定され、

前記改質領域は、前記内部においてクラックが発生した領域であるクラック領域、前記内部において溶融処理した領域である溶融処理領域及び前記内部において屈折率が変化した領域である屈折率変化領域のうち少なくともいずれか一つを含む、請求項1～14のいずれかに記載のレーザ加工装置。

【請求項16】 パルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせて、前記加工対象物にパルスレーザ光を照射することにより、前記加工対象物の切断予定ラインに沿って前記加工対象物の内部に多光子吸収による改質領域を形成する第1工程と、

パルスレーザ光のパワーを前記第1工程より大きく又は小さくするように調節し、かつパルスレーザ光の集光点を前記加工対象物の内部に合わせて、前記加工対象物にパルスレーザ光を照射することにより、前記加工対象物の他の切断予定ラインに沿って前記加工対象物の内部に多光子吸収による他の改質領域を形成する第2工程と、を備える、レーザ加工方法。

【請求項17】 パルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせて、前記加工対象物にパルスレーザ光を照射することにより、前記加工対象物の切断予定ラインに沿って前記加工対象物の内部に多光子吸収による改質領域を形成する第1工程と、

パルスレーザ光を集光する集光用レンズを含む光学系の開口数を前記第1工程より大きく又は小さくするように調節し、かつパルスレーザ光の集光点を前記加工対象物の内部に合わせて、前記加工対象物にパルスレーザ光を照射することにより、前記加工対象物の他の切断予定ラインに沿って前記加工対象物の内部に多光子吸収による他の改質領域を形成する第2工程と、を備える、レーザ加工方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、半導体材料基板、圧電材料基板やガラス基板等の加工対象物の切断に使用されるレーザ加工装置及びレーザ加工方法に関する。

【0002】

【従来の技術】 レーザ応用の一つに切断があり、レーザによる一般的な切断は次の通りである。例えば半導体ウェハやガラス基板のような加工対象物の切断する箇所

表面から裏面に向けて加熱溶融を進行させて加工対象物を切断する。しかし、この方法では加工対象物の表面のうち切断する箇所となる領域周辺も溶融される。よって、加工対象物が半導体ウェハの場合、半導体ウェハの表面に形成された半導体素子のうち、上記領域周辺に位置する半導体素子が溶融する恐れがある。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 加工対象物の表面の溶融を防止する方法として、例えば、特開2000-219528号公報や特開2000-15467号公報に開示されたレーザによる切断方法がある。これらの公報の切断方法では、加工対象物の切断する箇所をレーザ光により加熱し、そして加工対象物を冷却することにより、加工対象物の切断する箇所に熱衝撃を生じさせて加工対象物を切断する。

【0004】 しかし、これらの公報の切断方法では、加工対象物に生じる熱衝撃が大きいと、加工対象物の表面に、切断予定ラインから外れた割れやレーザ照射していない先の箇所までの割れ等の不必要な割れが発生することがある。よって、これらの切断方法では精密切断をすることができない。特に、加工対象物が半導体ウェハ、液晶表示装置が形成されたガラス基板、電極パターンが形成されたガラス基板の場合、この不必要な割れにより半導体チップ、液晶表示装置、電極パターンが損傷することがある。また、これらの切断方法では平均入力エネルギーが大きいので、半導体チップ等に与える熱的ダメージも大きい。

【0005】 本発明の目的は、加工対象物の表面に不必要な割れを発生させることなくかつその表面が溶融しないレーザ加工装置及びレーザ加工方法を提供することである。

【0006】

【課題を解決するための手段】 本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が1 μ s以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、パルスレーザ光のパワー大きさの入力に基づいてレーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が1 $\times 10^8$ (W/cm²) 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光手段と、集光手段により集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、を備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、入力されたパルスレーザ光の

る改質スポットの寸法を相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法を表示する寸法表示手段と、を備えることを特徴とする。

【0007】本発明に係るレーザ加工装置によれば、パルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせ、かつ集光点におけるピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm²)以上であってパルス幅が1 μ s以下の条件で、加工対象物にパルスレーザ光を照射することができる。よって、本発明に係るレーザ加工装置を用いてパルスレーザ光を加工対象物に照射すると、加工対象物の内部に多光子吸収という現象が生じ、これにより加工対象物の内部に改質領域が形成される。加工対象物の切断する箇所に何らかの起点があると、加工対象物を比較的小さな力で割って切断することができる。よって、本発明に係るレーザ加工装置を用いて加工された加工対象物は、改質領域を起点として切断予定ラインに沿って割る又は割れることにより切断することができる。従って、比較的小さな力で加工対象物を切断することができるので、加工対象物の表面に切断予定ラインから外れた不必要な割れを発生させることなく加工対象物の切断が可能となる。

【0008】また、本発明に係るレーザ加工装置によれば、加工対象物の内部に局所的に多光子吸収を発生させて改質領域を形成している。よって、加工対象物の表面ではレーザ光がほとんど吸収されないので、加工対象物の表面が熔融することはない。なお、集光点とはレーザ光が集光した箇所のことである。切断予定ラインは加工対象物の表面や内部に実際に引かれた線でもよいし、仮想の線でもよい。以上のことはこれから説明するレーザ加工装置及びレーザ加工方法についても言えることである。

【0009】また、本発明者によれば、パルスレーザ光のパワーを小さくすると改質スポットが小さくなるように制御でき、パルスレーザ光のパワーを大きくすると改質スポットが大きくなるように制御できることが分かった。改質スポットとは、1パルスのパルスレーザ光により形成される改質部分であり、改質スポットが集まることにより改質領域となる。改質スポットの寸法の制御は加工対象物の切断に影響を及ぼす。すなわち、改質スポットが大きすぎると、加工対象物の切断予定ラインに沿った切断の精度及び切断面の平坦性が悪くなる。一方、厚みが大きい加工対象物に対して改質スポットが極端に小さすぎると加工対象物の切断が困難となる。本発明に係るレーザ加工装置によれば、パルスレーザ光のパワーの大きさを調節することにより、改質スポットの寸法の制御をすることができる。

【0010】また、本発明に係るレーザ加工装置は、パルスレーザ光のパワーの大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段を備える。

この大きさのパワーで形成される改質スポットの寸法を相関関係記憶手段から選択し、選択された改質スポットの寸法を表示している。よって、レーザ加工装置に入力されたパルスレーザ光のパワーの大きさにより形成される改質スポットの寸法をレーザ加工前に知ることができる。

【0011】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が1 μ s以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm²)以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、開口数の大きさの入力に基づいて集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する開口数調節手段と、集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段と、を備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、開口数調節手段により調節される開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、入力された開口数の大きさに基づいてこの大きさの開口数で形成される改質スポットの寸法を相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法を表示する寸法表示手段と、を備えることを特徴とする。

【0012】本発明者によれば、集光用レンズを含む光学系の開口数を大きくすると改質スポットを小さく制御でき、その開口数を小さくすると改質スポットを大きく制御できることが分かった。よって、本発明に係るレーザ加工装置によれば、集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節することにより改質スポットの寸法の制御をすることができる。

【0013】また、本発明に係るレーザ加工装置は、開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段を備える。入力された開口数の大きさに基づいてこの大きさの開口数で形成される改質スポットの寸法を相関関係記憶手段から選択し、選択された改質スポットの寸法を表示している。よって、レーザ加工装置に入力された開口数の大きさにより形成される改質スポットの寸法をレーザ加工前に知ることができる。

【0014】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が1 μ s以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm²)以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含むかつ複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手段とを備え、複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開

ズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、複数の集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、選択された集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさに基づいてこの大きさの開口数で形成される改質スポットの寸法を相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法を表示する寸法表示手段と、を備えることを特徴とする。

【0015】本発明に係るレーザ加工装置によれば、改質スポットの寸法の制御をすることができる。また、選択された集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさにより形成される改質スポットの寸法をレーザ加工前に知ることができる。

【0016】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が1 μ s以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、パルスレーザ光のパワー大きさの入力に基づいてレーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm²) 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、開口数の大きさの入力に基づいて集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する開口数調節手段と、集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び開口数調節手段により調節される開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、入力されたパルスレーザ光のパワーの大きさに及び入力された開口数の大きさに基づいてこれらの大きさを形成される改質スポットの寸法を相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法を表示する寸法表示手段と、を備えることを特徴とする。

【0017】本発明に係るレーザ加工装置によれば、パワーの調節と開口数の調節とを組み合わせることができるので、改質スポットの寸法の制御できる大きさの種類を増やすことが可能となる。また、上記本発明に係るレーザ加工装置と同様の理由により、改質スポットの寸法

【0018】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が1 μ s以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、パルスレーザ光のパワー大きさの入力に基づいてレーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm²) 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含みかつ複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手段とを備え、複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開口数が異なり、レンズ選択手段で選択された集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより、加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び複数の集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、入力されたパルスレーザ光のパワーの大きさに及び選択された集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさに基づいてこれらの大きさを形成される改質スポットの寸法を相関関係記憶手段から選択する寸法選択手段と、寸法選択手段により選択された改質スポットの寸法を表示する寸法表示手段と、を備えることを特徴とする。

【0019】本発明に係るレーザ加工装置によれば、上記本発明に係るレーザ加工装置と同様の理由により、改質スポットの寸法の制御できる大きさの種類を増やすことが可能となりかつ改質スポットの寸法をレーザ加工前に知ることができる。

【0020】以上説明したレーザ加工装置は、寸法選択手段で選択された寸法の改質スポットの画像を作成する画像作成手段と、画像作成手段により作成された画像を表示する画像表示手段と、を備えるようにすることができる。これによれば、形成される改質スポットについてレーザ加工前に視覚的に把握することができる。

【0021】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が1 μ s以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm²) 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光手段と、集光手段により集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレ

内部に1つの改質スポットが形成され、パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できるパルスレーザ光のパワーの大きさを相関関係記憶手段から選択するパワー選択手段とを備え、パワー調節手段はパワー選択手段により選択されたパワーの大きさとなるようにレーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節する、ことを特徴とする。

【0022】本発明に係るレーザ加工装置によれば、パルスレーザ光のパワーの大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段を備える。改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できるパルスレーザ光のパワーの大きさを相関関係記憶手段から選択される。パワー調節手段はパワー選択手段により選択されたパワーの大きさとなるようにレーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節する。よって、所望の寸法の改質スポットを形成することができる。

【0023】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する開口数調節手段と、集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、開口数調節手段により調節される開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できる開口数の大きさを相関関係記憶手段から選択する開口数選択手段とを備え、開口数調節手段は開口数選択手段により選択された開口数の大きさとなるように集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する、ことを特徴とする。

【0024】本発明に係るレーザ加工装置によれば、開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段を備える。改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できる開口数の大きさを相関関係記憶手段から選択する。開口数調節手段は開口数選択手段により選択された開口数の大きさとなるように集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する。よって、所望の寸法の改質スポットを形成する

【0025】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含むかつ複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手段とを備え、複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開口数が異なり、レンズ選択手段で選択された集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、複数の集光用レンズの開口数の大きさと改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できる開口数の大きさを相関関係記憶手段から選択する開口数選択手段とを備え、レンズ選択手段は開口数選択手段により選択された開口数の大きさとなるように複数の集光用レンズの選択をする、ことを特徴とする。

【0026】本発明に係るレーザ加工装置によれば、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できる開口数の大きさを相関関係記憶手段から選択する。レンズ選択手段は開口数選択手段により選択された開口数の大きさとなるように複数の集光用レンズの選択をする。よって、所望の寸法の改質スポットを形成することができる。

【0027】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズと、集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する開口数調節手段と、集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び開口数調節手段により調節される開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できるパワー及び開口数の大きさの組を相関関係記憶手段から選択す

手段は組選択手段により選択されたパワー及び開口数の大きさとなるようにレーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する、ことを特徴とする。

【0028】本発明に係るレーザ加工装置によれば、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できるパワーの大きさ及び開口数の大きさの組み合わせを相関関係記憶手段から選択する。そして、選択されたパワーの大きさ及び開口数の大きさとなるように、それぞれ、レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節する。よって、所望の寸法の改質スポットを形成することができる。また、パワーの大きさ及び開口数の大きさを組み合わせているので、改質スポットの寸法の制御できる大きさの種類を増やすことが可能である。

【0029】本発明に係るレーザ加工装置は、パルス幅が $1\mu\text{s}$ 以下のパルスレーザ光を出射するレーザ光源と、前記レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさを調節するパワー調節手段と、レーザ光源から出射されたパルスレーザ光の集光点のピークパワー密度が $1\times 10^8\text{ (W/cm}^2\text{)}$ 以上になるようにパルスレーザ光を集光する集光用レンズを複数含みかつ複数の集光用レンズを選択可能なレンズ選択手段とを備え、複数の集光用レンズを含む光学系はそれぞれ開口数が異なり、レンズ選択手段で選択された集光用レンズにより集光されたパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段と、加工対象物の切断予定ラインに沿ってパルスレーザ光の集光点を相対的に移動させる移動手段とを備え、加工対象物の内部に集光点を合わせて1パルスのパルスレーザ光を加工対象物に照射することにより加工対象物の内部に1つの改質スポットが形成され、パワー調節手段により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさ及び複数の集光用レンズの開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関係を予め記憶した相関関係記憶手段と、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できるパワー及び開口数の大きさの組を相関関係記憶手段から選択する組選択手段とを備え、パワー調節手段及びレンズ選択手段は組選択手段により選択されたパワー及び開口数の大きさとなるようにレーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさの調節及び複数の集光用レンズの選択をする、ことを特徴とする。

【0030】本発明に係るレーザ加工装置によれば、改質スポットの寸法の入力に基づいてこの寸法に形成できるパワーの大きさ及び開口数の大きさの組み合わせを相関関係記憶手段から選択する。選択されたパワーの大きさ及び開口数の大きさとなるように、それぞれ、レーザ光源から出射されるパルスレーザ光のパワーの大きさの調節及び複数の集光用レンズの選択をする。よって、所

た、パワーの大きさ及び開口数の大きさを組み合わせているので、改質スポットの寸法の制御できる大きさの種類を増やすことが可能である。

【0031】本発明に係るレーザ加工装置において、パワー選択手段により選択されたパワーの大きさを表示する表示手段、開口数選択手段により選択された開口数の大きさを表示する表示手段、組選択手段により選択された組のパワーの大きさ及び開口数の大きさを表示する表示手段を備えるようにすることができる。これによれば、改質スポットの寸法の入力に基づいてレーザ加工装置が動作するときのパワー、開口数を知ることができる。

【0032】本発明に係るレーザ加工装置において、切断予定ラインに沿って加工対象物の内部に複数の改質スポットを形成することができる。これらの改質スポットにより改質領域が規定される。改質領域は加工対象物の内部においてクラックが発生した領域であるクラック領域、加工対象物の内部において溶融処理した領域である溶融処理領域及び加工対象物の内部において屈折率が変化した領域である屈折率変化領域のうち少なくともいずれか一つを含む。

【0033】なお、パワー調節手段の態様として、例えば、NDフィルター及び偏光フィルターのうち少なくともいずれか一方を含む態様がある。また、レーザ光源が励起用レーザを含み、かつレーザ加工装置が励起用レーザの駆動電流を制御する駆動電流制御手段を備える態様もある。これらにより、パルスレーザ光のパワーの大きさを調節できる。また、開口数調節手段の態様として、例えば、ビームエキスパンダ及び虹彩絞りのうち少なくともいずれか一方を含む態様がある。

【0034】本発明に係るレーザ加工方法は、パルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせて、加工対象物にパルスレーザ光を照射することにより、加工対象物の切断予定ラインに沿って加工対象物の内部に多光子吸収による改質領域を形成する第1工程と、パルスレーザ光のパワーを第1工程より大きく又は小さくなるように調節し、かつパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせて、加工対象物にパルスレーザ光を照射することにより、加工対象物の他の切断予定ラインに沿って加工対象物の内部に多光子吸収による他の改質領域を形成する第2工程と、を備えることを特徴とする。

【0035】また、本発明に係るレーザ加工方法は、パルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせて、加工対象物にパルスレーザ光を照射することにより、加工対象物の切断予定ラインに沿って加工対象物の内部に多光子吸収による改質領域を形成する第1工程と、パルスレーザ光を集光する集光用レンズを含む光学系の開口数を第1工程より大きく又は小さくなるように調節し、かつパルスレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わ

り、加工対象物の他の切断予定ラインに沿って加工対象物の内部に多光子吸収による他の改質領域を形成する第2工程と、を備えることを特徴とする。

【0036】これら本発明に係るレーザ加工方法によれば、例えば、加工対象物の結晶方位が原因で切断が容易な方向と切断が困難な方向とがある場合、切断が容易な方向に形成する改質領域を構成する改質スポットの寸法を小さくし、切断が困難な方向に形成する他の改質領域を構成する改質スポットの寸法を大きくする。これにより、切断が容易な方向では平坦な切断面を得ることができ、また切断が困難な方向でも切断が可能となる。

【0037】

【発明の実施の形態】以下、本発明の好適な実施形態について図面を用いて説明する。本実施形態に係るレーザ加工方法及びレーザ加工装置は、多光子吸収により改質領域を形成している。多光子吸収はレーザ光の強度を非常に大きくした場合に発生する現象である。まず、多光子吸収について簡単に説明する。

【0038】材料の吸収のバンドギャップ E_g よりも光子のエネルギー $h\nu$ が小さいと光学的に透明となる。よって、材料に吸収が生じる条件は $h\nu > E_g$ である。しかし、光学的に透明でも、レーザ光の強度を非常に大きくすると $nh\nu > E_g$ の条件($n=2, 3, 4, \dots$ である)で材料に吸収が生じる。この現象を多光子吸収という。パルス波の場合、レーザ光の強度はレーザ光の集光点のピークパワー密度(W/cm^2)で決まり、例えばピークパワー密度が 1×10^8 (W/cm^2)以上の条件で多光子吸収が生じる。ピークパワー密度は、(集光点におけるレーザ光の1パルス当たりのエネルギー) \div (レーザ光のビームスポット断面積 \times パルス幅)により求められる。また、連続波の場合、レーザ光の強度はレーザ光の集光点の電界強度(W/cm^2)で決まる。

【0039】このような多光子吸収を利用する本実施形態に係るレーザ加工の原理について図1～図6を用いて説明する。図1はレーザ加工中の加工対象物1の平面図であり、図2は図1に示す加工対象物1のII-II線に沿った断面図であり、図3はレーザ加工後の加工対象物1の平面図であり、図4は図3に示す加工対象物1のIV-IV線に沿った断面図であり、図5は図3に示す加工対象物1のV-V線に沿った断面図であり、図6は切断された加工対象物1の平面図である。

【0040】図1及び図2に示すように、加工対象物1の表面3には切断予定ライン5がある。切断予定ライン5は直線状に延びた仮想線である。本実施形態に係るレーザ加工は、多光子吸収が生じる条件で加工対象物1の内部に集光点Pを合わせてレーザ光Lを加工対象物1に照射して改質領域7を形成する。なお、集光点とはレーザ光Lが集光した箇所のことである。

【0041】レーザ光Lを切断予定ライン5に沿って

とにより、集光点Pを切断予定ライン5に沿って移動させる。これにより、図3～図5に示すように改質領域7が切断予定ライン5に沿って加工対象物1の内部にのみ形成される。本実施形態に係るレーザ加工方法は、加工対象物1がレーザ光Lを吸収することにより加工対象物1を発熱させて改質領域7を形成するのではない。加工対象物1にレーザ光Lを透過させ加工対象物1の内部に多光子吸収を発生させて改質領域7を形成している。よって、加工対象物1の表面3ではレーザ光Lがほとんど吸収されないので、加工対象物1の表面3が熔融することはない。

【0042】加工対象物1の切断において、切断する箇所に起点があると加工対象物1はその起点から割れるので、図6に示すように比較的小さな力で加工対象物1を切断することができる。よって、加工対象物1の表面3に不必要な割れを発生させることなく加工対象物1の切断が可能となる。

【0043】なお、改質領域を起点とした加工対象物の切断は、次の二通りが考えられる。一つは、改質領域形成後、加工対象物に人為的な力が印加されることにより、改質領域を起点として加工対象物が割れ、加工対象物が切断される場合である。これは、例えば加工対象物の厚みが大きい場合の切断である。人為的な力が印加されるとは、例えば、加工対象物の切断予定ラインに沿って加工対象物に曲げ応力やせん断応力を加えたり、加工対象物に温度差を与えることにより熱応力を発生させたりすることである。他の一つは、改質領域を形成することにより、改質領域を起点として加工対象物の断面方向(厚さ方向)に向かって自然に割れ、結果的に加工対象物が切断される場合である。これは、例えば加工対象物の厚みが小さい場合、改質領域が1つでも可能であり、加工対象物の厚みが大きい場合、厚さ方向に複数の改質領域を形成することで可能となる。なお、この自然に割れる場合も、切断する箇所において、改質領域が形成されていない部分上の表面まで割れが先走ることがなく、改質部を形成した部分上の表面のみを切断することができるので、切断を制御よくすることができる。近年、シリコンウェハ等の半導体ウェハの厚みは薄くなる傾向にあるので、このような制御性のよい切断方法は大変有効である。

【0044】さて、本実施形態において多光子吸収により形成される改質領域として、次の(1)～(3)がある。

【0045】(1)改質領域が一つ又は複数のクラックを含むクラック領域の場合。

レーザ光を加工対象物(例えばガラスやLiTaO₃からなる圧電材料)の内部に集光点を合わせて、集光点における電界強度が 1×10^8 (W/cm^2)以上でかつパルス幅が1 μs 以下の条件で照射する。このパルス幅の大きさは、

ージを与えずに、加工対象物の内部にのみクラック領域を形成できる条件である。これにより、加工対象物の内部には多光子吸収による光学的損傷という現象が発生する。この光学的損傷により加工対象物の内部に熱ひずみが誘起され、これにより加工対象物の内部にクラック領域が形成される。電界強度の上限値としては、例えば 1×10^{12} (W/cm²) である。パルス幅は例えば 1 ns ~ 200 ns が好ましい。なお、多光子吸収によるクラック領域の形成は、例えば、第45回レーザ熱加工研究会論文集(1998年、12月)の第23頁~第28頁の「固体レーザ高調波によるガラス基板の内部マーキング」に記載されている。

【0046】本発明者は、電界強度とクラックの大きさとの関係を実験により求めた。実験条件は下記の通りである。

【0047】(A) 加工対象物：パイレックスガラス
(厚さ 700 μm)

(B) レーザ

光源：半導体レーザ励起Nd:YAGレーザ

波長：1064 nm

レーザ光スポット断面積： 3.14×10^{-8} cm²

発振形態：Qスイッチパルス

繰り返し周波数：100 kHz

パルス幅：30 ns

出力：出力<1 mJ/パルス

レーザ光品質：TEM₀₀

偏光特性：直線偏光

(C) 集光用レンズ

レーザ光波長に対する透過率：60パーセント

(D) 加工対象物が載置される載置台の移動速度：100 mm/秒

なお、レーザ光品質がTEM₀₀とは、集光性が高くレーザ光の波長程度まで集光可能を意味する。

【0048】図7は上記実験の結果を示すグラフである。横軸はピークパワー密度であり、レーザ光がパルスレーザ光なので電界強度はピークパワー密度で表される。縦軸は1パルスのレーザ光により加工対象物の内部に形成されたクラック部分(クラックスポット)の大きさを示している。クラックスポットが集まりクラック領域となる。クラックスポットの大きさは、クラックスポットの形状のうち最大の長さとなる部分の大きさである。グラフ中の黒丸で示すデータは集光用レンズ(C)の倍率が100倍、開口数(NA)が0.80の場合である。一方、グラフ中の白丸で示すデータは集光用レンズ(C)の倍率が50倍、開口数(NA)が0.55の場合である。ピークパワー密度が 10^{11} (W/cm²) 程度から加工対象物の内部にクラックスポットが発生し、ピークパワー密度が大きくなるに従いクラックスポットも大きくなること分かる。

て、クラック領域形成による加工対象物の切断のメカニズムについて図8~図11を用いて説明する。図8に示すように、多光子吸収が生じる条件で加工対象物1の内部に集光点Pを合わせてレーザ光Lを加工対象物1に照射して切断予定ラインに沿って内部にクラック領域9を形成する。クラック領域9は一つ又は複数のクラックを含む領域である。図9に示すようにクラック領域9を起点としてクラックがさらに成長し、図10に示すようにクラックが加工対象物1の表面3と裏面2に到達し、図11に示すように加工対象物1が割れることにより加工対象物1が切断される。加工対象物の表面と裏面に到達するクラックは自然に成長する場合もあるし、加工対象物に力が印加されることにより成長する場合もある。

【0050】(2) 改質領域が熔融処理領域の場合
レーザ光を加工対象物(例えばシリコンのような半導体材料)の内部に集光点を合わせて、集光点における電界強度が 1×10^8 (W/cm²) 以上でかつパルス幅が1 μs 以下の条件で照射する。これにより加工対象物の内部は多光子吸収によって局所的に加熱される。この加熱により加工対象物の内部に熔融処理領域が形成される。熔融処理領域とは一旦熔融後再固化した領域、熔融状態中の領域及び熔融から再固化する状態中の領域のうち少なくともいずれか一つを意味する。また、熔融処理領域は相変化した領域や結晶構造が変化した領域ということもできる。また、熔融処理領域とは単結晶構造、非晶質構造、多結晶構造において、ある構造が別の構造に変化した領域ということもできる。つまり、例えば、単結晶構造から非晶質構造に変化した領域、単結晶構造から多結晶構造に変化した領域、単結晶構造から非晶質構造及び多結晶構造を含む構造に変化した領域を意味する。加工対象物がシリコン単結晶構造の場合、熔融処理領域は例えば非晶質シリコン構造である。なお、電界強度の上限値としては、例えば 1×10^{12} (W/cm²) である。パルス幅は例えば 1 ns ~ 200 ns が好ましい。

【0051】本発明者は、シリコンウェハの内部で熔融処理領域が形成されることを実験により確認した。実験条件は下記の通りである。

【0052】(A) 加工対象物：シリコンウェハ(厚さ 350 μm、外径4インチ)

(B) レーザ

光源：半導体レーザ励起Nd:YAGレーザ

波長：1064 nm

レーザ光スポット断面積： 3.14×10^{-8} cm²

発振形態：Qスイッチパルス

繰り返し周波数：100 kHz

パルス幅：30 ns

出力：20 μJ/パルス

レーザ光品質：TEM₀₀

偏光特性：直線偏光

倍率：50倍

NA：0.55

レーザ光波長に対する透過率：60パーセント

(D) 加工対象物が載置される載置台の移動速度：100mm/秒

図12は上記条件でのレーザ加工により切断されたシリコンウェハの一部における断面の写真を表した図である。シリコンウェハ11の内部に熔融処理領域13が形成されている。なお、上記条件により形成された熔融処理領域の厚さ方向の大きさは100μm程度である。

【0053】熔融処理領域13が多光子吸収により形成されたことを説明する。図13は、レーザ光の波長とシリコン基板の内部の透過率との関係を示すグラフである。ただし、シリコン基板の表面側と裏面側それぞれの反射成分を除去し、内部のみの透過率を示している。シリコン基板の厚みが50μm、100μm、200μm、500μm、1000μmの各々について上記関係を示した。

【0054】例えば、Nd:YAGレーザの波長である1064nmにおいて、シリコン基板の厚みが500μm以下の場合、シリコン基板の内部ではレーザ光が80%以上透過することが分かる。図12に示すシリコンウェハ11の厚さは350μmであるので、多光子吸収による熔融処理領域はシリコンウェハの中心付近、つまり表面から175μmの部分に形成される。この場合の透過率は、厚さ200μmのシリコンウェハを参考にすると、90%以上なので、レーザ光がシリコンウェハ11の内部で吸収されるのは僅かであり、ほとんどが透過する。このことは、シリコンウェハ11の内部でレーザ光が吸収されて、熔融処理領域がシリコンウェハ11の内部に形成（つまりレーザ光による通常の加熱で熔融処理領域が形成）されたものではなく、熔融処理領域が多光子吸収により形成されたことを意味する。多光子吸収による熔融処理領域の形成は、例えば、溶接学会全国大会講演概要第66集（2000年4月）の第72頁～第73頁の「ピコ秒パルスレーザによるシリコンの加工特性評価」に記載されている。

【0055】なお、シリコンウェハは、熔融処理領域を起点として断面方向に向かって割れを発生させ、その割れがシリコンウェハの表面と裏面に到達することにより、結果的に切断される。シリコンウェハの表面と裏面に到達するこの割れは自然に成長する場合もあるし、加工対象物に力が印加されることにより成長する場合もある。なお、熔融処理領域からシリコンウェハの表面と裏面に割れが自然に成長するのは、一旦熔融後再固化した状態となった領域から割れが成長する場合、熔融状態の領域から割れが成長する場合及び熔融から再固化する状態の領域から割れが成長する場合のうち少なくともいずれか一つである。いずれの場合も切断後の切断面は図1

加工対象物の内部に熔融処理領域を形成する場合、切断時、切断予定ラインから外れた不必要な割れが生じにくいので、切断制御が容易となる。

【0056】(3) 改質領域が屈折率変化領域の場合レーザ光を加工対象物（例えばガラス）の内部に集光点を合わせて、集光点における電界強度が 1×10^8 (W/cm²)以上でかつパルス幅が1ns以下の条件で照射する。パルス幅を極めて短くして、多光子吸収を加工対象物の内部に起こさせると、多光子吸収によるエネルギーが熱エネルギーに転化せずに、加工対象物の内部にはイオン価数変化、結晶化又は分極配向等の永続的な構造変化が誘起されて屈折率変化領域が形成される。電界強度の上限値としては、例えば 1×10^{12} (W/cm²)である。パルス幅は例えば1ns以下が好ましく、1ps以下がさらに好ましい。多光子吸収による屈折率変化領域の形成は、例えば、第42回レーザ熱加工研究会論文集（1997年、11月）の第105頁～第111頁の「フェムト秒レーザ照射によるガラス内部への光誘起構造形成」に記載されている。

【0057】以上のように本実施形態によれば、改質領域を多光子吸収により形成している。そして、本実施形態は、パルスレーザ光のパワーの大きさや集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさを調節することにより、改質スポットの寸法を制御している。改質スポットとは、パルスレーザ光の1パルスのショット（つまり1パルスのレーザ照射）で形成される改質部分であり、改質スポットが集まることにより改質領域となる。改質スポットの寸法制御の必要性についてクラックスポットを例に説明する。

【0058】クラックスポットが大きすぎると、切断予定ラインに沿った加工対象物の切断の精度が下がり、また、切断面の平坦性が悪くなる。これについて図14～図19を用いて説明する。図14は本実施形態に係るレーザ加工方法を用いてクラックスポットを比較的大きく形成した場合の加工対象物1の平面図である。図15は図14の切断予定ライン5上のXV-XVに沿って切断した断面図である。図16、図17、図18はそれぞれ図14の切断予定ライン5と直交するXVI-XVI、XVII-XVII、XVIII-XVIIIに沿って切断した断面図である。これらの図から分かるように、クラックスポット90が大きすぎると、クラックスポット90の大きさのばらつきも大きくなる。よって、図19に示すように切断予定ライン5に沿った加工対象物1の切断の精度が悪くなる。また、加工対象物1の切断面43の凹凸が大きくなるので切断面43の平坦性が悪くなる。これに対して、図20に示すように、本実施形態に係るレーザ加工方法を用いてクラックスポット90を比較的小さく（例えば20μm以下）形成すると、クラックスポット90を均一に形成できかつクラックスポット90の切断予定ラインの方向か

示すように切断予定ライン5に沿った加工対象物1の切断の精度や切断面43の平坦性を向上させることができる。

【0059】このようにクラックスポットが大きすぎると、切断予定ラインに沿った精密な切断や平坦な切断面が得られる切断をすることができない。但し、厚みが大きい加工対象物に対してクラックスポットが極度に小さすぎると加工対象物の切断が困難となる。

【0060】本実施形態によればクラックスポットの寸法を制御できることについて説明する。図7に示すように、ピークパワー密度が同じ場合、集光用レンズの倍率100、NA0.8の場合のクラックスポットの大きさは、集光用レンズの倍率50、NA0.55の場合のクラックスポットの大きさよりも小さくなる。ピークパワー密度は、先程説明したようにレーザ光の1パルス当たりのエネルギー、つまりパルスレーザ光のパワーと比例するので、ピークパワー密度が同じとはレーザ光のパワーが同じであることを意味する。このように、レーザ光のパワーが同じでかつビームスポット断面積が同じ場合、集光用レンズの開口数が大きく（小さく）なるとクラックスポットの寸法を小さく（大きく）制御できる。

【0061】また、集光用レンズの開口数が同じでも、レーザ光のパワー（ピークパワー密度）を小さくするとクラックスポットの寸法を小さく制御でき、レーザ光のパワーを大きくするとクラックスポットの寸法を大きく制御できる。

【0062】よって、図7に示すグラフから分かるように、集光用レンズの開口数を大きくすることやレーザ光のパワーを小さくすることによりクラックスポットの寸法を小さく制御できる。逆に、集光用レンズの開口数を小さくすることやレーザ光のパワーを大きくすることによりクラックスポットの寸法を大きく制御できる。

【0063】クラックスポットの寸法制御について、図面を用いてさらに説明する。図22に示す例は、所定の開口数の集光用レンズを用いてパルスレーザ光Lが内部に集光されている加工対象物1の断面図である。領域41は、このレーザ照射により多光子吸収を起こさせるしきい値以上の電界強度になった領域である。図23は、このレーザ光Lの照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポット90の断面図である。一方、図24に示す例は、図22に示す例より大きい開口数の集光用レンズを用いてパルスレーザ光Lが内部に集光されている加工対象物1の断面図である。図25は、このレーザ光Lの照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポット90の断面図である。クラックスポット90の高さhは領域41の加工対象物1の厚さ方向における寸法に依存し、クラックスポット90の幅wは領域41の加工対象物1の厚さ方向と直交する方向の寸法に依存する。つまり、領域41のこれらの寸法を小さくする

これらの寸法を大きくするとクラックスポット90の高さhや幅wを大きくできる。図23と図25を比較すれば明らかなように、レーザ光のパワーが同じ場合、集光用レンズの開口数を大きく（小さく）することにより、クラックスポット90の高さhや幅wの寸法を小さく（大きく）制御できる。

【0064】さらに、図26に示す例は、図22に示す例より小さいパワーのパルスレーザ光Lが内部に集光されている加工対象物1の断面図である。図26に示す例ではレーザ光のパワーを小さくしているので領域41の面積は図22に示す領域41よりも小さくなる。図27は、このレーザ光Lの照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポット90の断面図である。図23と図27の比較から明らかなように、集光用レンズの開口数が同じ場合、レーザ光のパワーを小さく（大きく）するとクラックスポット90の高さhや幅wの寸法を小さく（大きく）制御できる。

【0065】さらに、図28に示す例は、図24に示す例より小さいパワーのパルスレーザ光Lが内部に集光されている加工対象物1の断面図である。図29は、このレーザ光Lの照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポット90の断面図である。図23と図29の比較から分かるように、集光用レンズの開口数を大きく（小さく）しかつレーザ光のパワーを小さく（大きく）すると、クラックスポット90の高さhや幅wの寸法を小さく（大きく）制御できる。

【0066】ところで、クラックスポットの形成可能な電界強度のしきい値以上の電界強度となっている領域を示す領域41が集光点P及びその付近に限定されている理由は以下の通りである。本実施形態は、高ビーム品質のレーザ光源を利用しているため、レーザ光の集光性が高くかつレーザ光の波長程度まで集光可能となる。このため、このレーザ光のビームプロファイルはガウシアン分布となるので、電界強度はビームの中心が最も強く、中心から距離が大きくなるに従って強度が低下していくような分布となる。このレーザ光が実際に集光用レンズによって集光されていく過程においても基本的にはガウシアン分布の状態で集光されていく。よって、領域41は集光点P及びその付近に限定される。

【0067】以上のように本実施形態によればクラックスポットの寸法を制御できる。クラックスポットの寸法は、精密な切断の程度の要求、切断面における平坦性の程度の要求、加工対象物の厚みの大きさを考慮して決める。また、クラックスポットの寸法は加工対象物の材質を考慮して決定することもできる。本実施形態によれば、改質スポットの寸法を制御できるので、厚みが比較的小さい加工対象物については改質スポットを小さくすることにより、切断予定ラインに沿って精密に切断ができ、かつ、切断面の平坦性がよい切断をすることが可能

厚みが比較的大きい加工対象物でも切断が可能となる。

【0068】また、例えば加工対象物の結晶方位が原因により、加工対象物に切断が容易な方向と切断が困難な方向とがある場合がある。このような加工対象物の切断において、例えば図20及び図21に示すように、切断が容易な方向に形成するクラックスポット90の寸法を小さくする。一方、図21及び図30に示すように、切断予定ライン5と直交する切断予定ラインの方向が切断困難な方向の場合、この方向に形成するクラックスポット90の寸法を大きくする。これにより、切断が容易な方向では平坦な切断面を得ることができ、また切断が困難な方向でも切断が可能となる。

【0069】改質スポットの寸法の制御ができることについて、クラックスポットの場合で説明したが、熔融処理スポットや屈折率変化スポットでも同様のことが言える。パルスレーザー光のパワーは例えば1パルス当たりのエネルギー(J)で表すこともできるし、1パルス当たりのエネルギーにレーザー光の周波数を乗じた値である平均出力(W)で表すこともできる。

【0070】次に、本実施形態の具体例を説明する。

【0071】〔第1例〕本実施形態の第1例に係るレーザー加工装置について説明する。図31はこのレーザー加工装置400の概略構成図である。レーザー加工装置400は、レーザー光Lを発生するレーザー光源101と、レーザー光Lのパワーやパルス幅等を調節するためにレーザー光源101を制御するレーザー光源制御部102と、レーザー光源101から出射されたレーザー光Lのパワーを調節するパワー調節部401と、を備える。

【0072】パワー調節部401は、例えば、複数のND(neutral density)フィルタと、各NDフィルタをレーザー光Lの光軸に対して垂直な位置に移動させたりレーザー光Lの光路外に移動させたりする機構と、を備える。NDフィルタは、エネルギーの相対分光分布を変えずに光の強さを減らすフィルタである。複数のNDフィルタはそれぞれ減光率が異なる。パワー調節部401は、複数のNDフィルタの何れか又はこれらを組み合わせることにより、レーザー光源101から出射されたレーザー光Lのパワーを調節する。なお、複数のNDフィルタの減光率を同じとし、パワー調節部401がレーザー光Lの光軸に対して垂直な位置に移動させるNDフィルタの個数を変えることにより、レーザー光源101から出射されたレーザー光Lのパワーを調節することもできる。

【0073】なお、パワー調節部401は、直線偏光のレーザー光Lの光軸に対して垂直に配置された偏光フィルタと、偏光フィルタをレーザー光Lの光軸を中心に所望の角度だけ回転させる機構と、を備えたものでもよい。パワー調節部401において光軸を中心に所望の角度だけ偏光フィルタを回転させることにより、レーザー光源101から出射されたレーザー光Lのパワーを調節する。

レーザーの駆動電流を駆動電流制御手段の一例であるレーザー光源制御部102で制御することにより、レーザー光源101から出射されるレーザー光Lのパワーを調節することもできる。よって、レーザー光Lのパワーは、パワー調節部401及びレーザー光源制御部102の少なくともいずれか一方により調節することができる。レーザー光源制御部102によるレーザー光Lのパワーの調節だけで改質領域の寸法を所望値にできるのであればパワー調節部401は不要である。以上説明したパワーの調節は、レーザー加工装置の操作者が後で説明する全体制御部127にキーボード等を用いてパワーの大きさを入力することによりなされる。

【0075】レーザー加工装置400はさらに、パワー調節部401でパワーが調節されたレーザー光Lが入射しかつレーザー光Lの光軸の向きを90°変えるように配置されたダイクロイックミラー103と、ダイクロイックミラー103で反射されたレーザー光Lを集光する集光用レンズを複数含むレンズ選択機構403と、レンズ選択機構403を制御するレンズ選択機構制御部405と、を備える。

【0076】レンズ選択機構403は集光用レンズ105a、105b、105cと、これらを支持する支持板407と、を備える。集光用レンズ105aを含む光学系の開口数、集光用レンズ105bを含む光学系の開口数、集光用レンズ105cを含む光学系の開口数はそれぞれ異なる。レンズ選択機構403は、レンズ選択機構制御部405からの信号に基づいて支持板407を回転させることにより、集光用レンズ105a、105b、105cの中から所望の集光用レンズをレーザー光Lの光軸上に配置させる。すなわち、レンズ選択機構403はレボルバー式である。

【0077】なお、レンズ選択機構403に取付けられる集光用レンズの数は3個に限定されず、それ以外の数でもよい。レーザー加工装置の操作者が後で説明する全体制御部127にキーボード等を用いて開口数の大きさ又は集光用レンズ105a、105b、105cのうちどれかを選択する指示を入力することにより、集光用レンズの選択、つまり開口数の選択がなされる。

【0078】レーザー加工装置400はさらに、集光用レンズ105a～105cのうちレーザー光Lの光軸上に配置された集光用レンズで集光されたレーザー光Lが照射される加工対象物1が載置される載置台107と、載置台107をX軸方向に移動させるためのX軸ステージ109と、載置台107をX軸方向に直交するY軸方向に移動させるためのY軸ステージ111と、載置台107をX軸及びY軸方向に直交するZ軸方向に移動させるためのZ軸ステージ113と、これら三つのステージ109、111、113の移動を制御するステージ制御部115と、を備える。

る方向なので、加工対象物1に入射するレーザ光Lの焦点深度の方向となる。よって、Z軸ステージ113をZ軸方向に移動させることにより、加工対象物1の内部にレーザ光Lの集光点Pを合わせることができる。また、この集光点PのX(Y)軸方向の移動は、加工対象物1をX(Y)軸ステージ109(111)によりX(Y)軸方向に移動させることにより行う。X(Y)軸ステージ109(111)が移動手段の一例となる。

【0080】レーザ光源101はパルスレーザ光を発生するNd:YAGレーザである。レーザ光源101に用いることができるレーザとして、この他、Nd:YVO₄レーザやNd:YLFレーザやチタンサファイアレーザがある。クラック領域や溶融処理領域を形成する場合、Nd:YAGレーザ、Nd:YVO₄レーザ、Nd:YLFレーザを用いるのが好適である。屈折率変化領域を形成する場合、チタンサファイアレーザを用いるのが好適である。

【0081】第1例では加工対象物1の加工にパルスレーザ光を用いているが、多光子吸収を起こさせることができるなら連続波レーザ光でもよい。集光用レンズ105a~105cは集光手段の一例である。Z軸ステージ113はレーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせる手段の一例である。集光用レンズ105a~105cをZ軸方向に移動させることによって、レーザ光の集光点を加工対象物の内部に合わせることができる。

【0082】レーザ加工装置400はさらに、載置台107に載置された加工対象物1を可視光線により照明するために可視光線を発生する観察用光源117と、ダイクロイックミラー103及び集光用レンズ105と同じ光軸上に配置された可視光用のビームスプリッタ119と、を備える。ビームスプリッタ119と集光用レンズ105との間にダイクロイックミラー103が配置されている。ビームスプリッタ119は、可視光線の約半分を反射し残りの半分を透過する機能を有しかつ可視光線の光軸の向きを90°変えるように配置されている。観察用光源117から発生した可視光線はビームスプリッタ119で約半分が反射され、この反射された可視光線がダイクロイックミラー103及び集光用レンズ105を透過し、加工対象物1の切断予定ライン5等を含む表面3を照明する。

【0083】レーザ加工装置400はさらに、ビームスプリッタ119、ダイクロイックミラー103及び集光用レンズ105と同じ光軸上に配置された撮像素子121及び結像レンズ123を備える。撮像素子121としては例えばCCD(charge-coupled device)カメラがある。切断予定ライン5等を含む表面3を照明した可視光線の反射光は、集光用レンズ105、ダイクロイックミラー103、ビームスプリッタ119を透過し、結像レンズ123で結像されて撮像素子121で撮像され、撮像データとなる。

121から出力された撮像データが入力される撮像データ処理部125と、レーザ加工装置400全体を制御する全体制御部127と、モニタ129と、を備える。撮像データ処理部125は、撮像データを基にして観察用光源117で発生した可視光の焦点が表面3上に合わせるための焦点データを演算する。この焦点データを基にしてステージ制御部115がZ軸ステージ113を移動制御することにより、可視光の焦点が表面3に合うようにする。よって、撮像データ処理部125はオートフォーカスユニットとして機能する。また、撮像データ処理部125は、撮像データを基にして表面3の拡大画像等の画像データを演算する。この画像データは全体制御部127に送られ、全体制御部で各種処理がなされ、モニタ129に送られる。これにより、モニタ129に拡大画像等が表示される。

【0085】全体制御部127には、ステージ制御部115からのデータ、撮像データ処理部125からの画像データ等が入力し、これらのデータも基にしてレーザ光源制御部102、観察用光源117及びステージ制御部115を制御することにより、レーザ加工装置400全体を制御する。よって、全体制御部127はコンピュータユニットとして機能する。また、全体制御部127はパワー調節部401と電氣的に接続されている。図31はこの図示を省略している。全体制御部127にパワーの大きさが入力されることにより、全体制御部127はパワー調節部401を制御し、これによりパワーが調節される。

【0086】図32は全体制御部127の一例の一部分を示すブロック図である。全体制御部127は、寸法選択部411、相関関係記憶部413及び画像作成部415を備える。寸法選択部411にはレーザ加工装置の操作者がキーボード等により、パルスレーザ光のパワーの大きさや集光用レンズを含む光学系の開口数の大きさが入力される。この例においては、開口数の大きさを直接入力する代わりに集光用レンズ105a、105b、105cのいずれかを選択する入力にしてもよい。この場合、全体制御部127に集光用レンズ105a、105b、105c、それぞれの開口数を予め登録しておき、選択された集光用レンズを含む光学系の開口数のデータが自動的に寸法選択部411に入力される。

【0087】相関関係記憶部413には、パルスレーザ光のパワーの大きさ及び開口数の大きさの組と改質スポットの寸法との相関関係が予め記憶されている。図33は、この相関関係を示すテーブルの一例である。この例では、開口数の欄には集光用レンズ105a、105b、105cの各々について、それらを含む光学系の開口数が登録される。パワーの欄にはパワー調節部401により調節されるパルスレーザ光のパワーの大きさが登録される。寸法の欄には、対応する組のパワーと開口数との

される。例えば、パワーが 1.24×10^{11} (W/cm²)で、開口数が0.55のときに形成される改質スポットの寸法は $120 \mu\text{m}$ である。この相関関係のデータは、例えば、レーザ加工前に図22～図29で説明した実験をすることにより得ることができる。

【0088】寸法選択部411にパワーの大きさ及び開口数の大きさが入力されることにより、寸法選択部411は相関関係記憶部413からこれらの大きさと同じ値の組を選択し、その組に対応する寸法のデータをモニタ129に送る。これにより、モニタ129には入力されたパワーの大きさ及び開口数の大きさのもとで形成される改質スポットの寸法が表示される。これらの大きさと同じ値の組がない場合は、最も近い値の組に対応する寸法データがモニタ129に送られる。

【0089】寸法選択部411で選択された組に対応する寸法のデータは、寸法選択部411から画像作成部415に送られる。画像作成部415は、この寸法のデータを基にしてこの寸法の改質スポットの画像データを作成し、モニタ129に送る。これにより、モニタ129には改質スポットの画像も表示される。よって、レーザ加工前に改質スポットの寸法や改質スポットの形状を知ることができる。

【0090】パワーの大きさを固定し、開口数の大きさを可変とすることもできる。この場合のテーブルは図34に示すようになる。例えば、パワーを 1.49×10^{11} (W/cm²)と固定し開口数が0.55のときに形成される改質スポットの寸法は $150 \mu\text{m}$ である。また、開口数の大きさを固定し、パワーの大きさを可変とすることもできる。この場合のテーブルは図35に示すようになる。例えば、開口数を0.8と固定しパワーが 1.19×10^{11} (W/cm²)のときに形成される改質スポットの寸法は $30 \mu\text{m}$ である。

【0091】次に、図31及び図36を用いて、本実施形態の第1例に係るレーザ加工方法を説明する。図36は、このレーザ加工方法を説明するためのフローチャートである。加工対象物1はシリコンウェハである。

【0092】まず、加工対象物1の光吸収特性を図示しない分光光度計等により測定する。この測定結果に基づいて、加工対象物1に対して透明な波長又は吸収の少ない波長のレーザ光Lを発生するレーザ光源101を選定する(S101)。次に、加工対象物1の厚さを測定する。厚さの測定結果及び加工対象物1の屈折率を基にして、加工対象物1のZ軸方向の移動量を決定する(S103)。これは、レーザ光Lの集光点Pが加工対象物1の内部に位置させるために、加工対象物1の表面3に位置するレーザ光Lの集光点を基準とした加工対象物1のZ軸方向の移動量である。この移動量を全体制御部127に入力される。

【0093】加工対象物1をレーザ加工装置400の載

可視光を発生させて加工対象物1を照明する(S105)。照明された切断予定ライン5を含む加工対象物1の表面3を撮像素子121により撮像する。この撮像データは撮像データ処理部125に送られる。この撮像データに基づいて撮像データ処理部125は観察用光源117の可視光の焦点が表面3に位置するような焦点データを演算する(S107)。

【0094】この焦点データはステージ制御部115に送られる。ステージ制御部115は、この焦点データを基にしてZ軸ステージ113をZ軸方向の移動させる(S109)。これにより、観察用光源117の可視光の焦点が表面3に位置する。なお、撮像データ処理部125は撮像データに基づいて、切断予定ライン5を含む加工対象物1の表面3の拡大画像データを演算する。この拡大画像データは全体制御部127を介してモニタ129に送られ、これによりモニタ129に切断予定ライン5付近の拡大画像が表示される。

【0095】全体制御部127には予めステップS103で決定された移動量データが入力されており、この移動量データがステージ制御部115に送られる。ステージ制御部115はこの移動量データに基づいて、レーザ光Lの集光点Pが加工対象物1の内部となる位置に、Z軸ステージ113により加工対象物1をZ軸方向に移動させる(S111)。

【0096】次に、上記で説明したようにパワー及び開口数の大きさを全体制御部127に入力する。入力されたパワーのデータに基づいて、レーザ光Lのパワーはパワー調節部401により調節される。入力された開口数のデータに基づいて、開口数はレンズ選択機構制御部405を介してレンズ選択機構403が集光用レンズを選択することにより調節される。また、これらのデータは全体制御部127の寸法選択部411(図32)に入力される。これにより、1パルスのレーザ光Lの照射により加工対象物1の内部に形成される溶融処理スポットの寸法及び溶融処理スポットの形状がモニタ129に表示される(S112)。

【0097】次に、レーザ光源101からレーザ光Lを発生させて、レーザ光Lを加工対象物1の表面3の切断予定ライン5に照射する。レーザ光Lの集光点Pは加工対象物1の内部に位置しているので、溶融処理領域は加工対象物1の内部にのみ形成される。そして、切断予定ライン5に沿うようにX軸ステージ109やY軸ステージ111を移動させて、溶融処理領域を切断予定ライン5に沿うように加工対象物1の内部に形成する(S113)。そして、加工対象物1を切断予定ライン5に沿って曲げることにより、加工対象物1を切断する(S115)。これにより、加工対象物1をシリコンチップに分割する。

【0098】第1例の効果を説明する。これによれば、

に集光点Pを合わせて、パルスレーザ光Lを切断予定ライン5に照射している。そして、X軸ステージ109やY軸ステージ111を移動させることにより、集光点Pを切断予定ライン5に沿って移動させている。これにより、改質領域（例えばクラック領域、溶融処理領域、屈折率変化領域）を切断予定ライン5に沿うように加工対象物1の内部に形成している。加工対象物の切断する箇所に何らかの起点があると、加工対象物を比較的小さな力で割って切断することができる。よって、改質領域を起点として切断予定ライン5に沿って加工対象物1を割ることにより、比較的小さな力で加工対象物1を切断することができる。これにより、加工対象物1の表面3に切断予定ライン5から外れた不必要な割れを発生させることなく加工対象物1を切断することができる。

【0099】また、第1例によれば、加工対象物1に多光子吸収を起こさせる条件でかつ加工対象物1の内部に集光点Pを合わせて、パルスレーザ光Lを切断予定ライン5に照射している。よって、パルスレーザ光Lは加工対象物1を透過し、加工対象物1の表面3ではパルスレーザ光Lがほとんど吸収されないの、改質領域形成が原因で表面3が溶融等のダメージを受けることはない。

【0100】以上説明したように第1例によれば、加工対象物1の表面3に切断予定ライン5から外れた不必要な割れや溶融が生じることなく、加工対象物1を切断することができる。よって、加工対象物1が例えば半導体ウェハの場合、半導体チップに切断予定ラインから外れた不必要な割れや溶融が生じることなく、半導体チップを半導体ウェハから切り出すことができる。表面に電極パターンが形成されている加工対象物や、圧電素子ウェハや液晶等の表示装置が形成されたガラス基板のように表面に電子デバイスが形成されている加工対象物についても同様である。よって、第1例によれば、加工対象物を切断することにより作製される製品（例えば半導体チップ、圧電デバイスチップ、液晶等の表示装置）の歩留まりを向上させることができる。

【0101】また、第1例によれば、加工対象物1の表面3の切断予定ライン5は溶融しないので、切断予定ライン5の幅（この幅は、例えば半導体ウェハの場合、半導体チップとなる領域同士の間隔である。）を小さくできる。これにより、一枚の加工対象物1から作製される製品の数が増え、製品の生産性を向上させることができる。

【0102】また、第1例によれば、加工対象物1の切断加工にレーザ光を用いるので、ダイヤモンドカッタを用いたダイシングよりも複雑な加工が可能となる。例えば、図37に示すように切断予定ライン5が複雑な形状であっても、第1例によれば切断加工が可能となる。これらの効果は後に説明する例でも同様である。

【0103】[第2例]次に、本実施形態の第2例につい

加工装置500の概略構成図である。レーザ加工装置500の構成要素のうち、図31に示す第1例に係るレーザ加工装置400の構成要素と同一要素については同一符号を付すことによりその説明を省略する。

【0104】レーザ加工装置500は、パワー調節部401とダイクロイックミラー103との間のレーザ光Lの光軸上にビームエキスパンダ501が配置されている。ビームエキスパンダ501は倍率可変であり、ビームエキスパンダ501によりレーザ光Lのビーム径が大きくなるように調節される。ビームエキスパンダ501は開口数調節手段の一例である。また、レーザ加工装置500はレンズ選択機構403の代わりに1つの集光用レンズ105を備える。

【0105】レーザ加工装置500の動作が第1例のレーザ加工装置の動作と異なる点は、全体制御部127に入力された開口数の大きさに基づく開口数の調節である。以下、これについて説明する。全体制御部127はビームエキスパンダ501と電気的に接続されている。図38はこの図示を省略している。全体制御部127に開口数の大きさが入力されることにより、全体制御部127はビームエキスパンダ501の倍率を変える制御をする。これにより、集光用レンズ105に入射するレーザ光Lのビーム径の拡大率を調節する。よって、集光用レンズ105が1つであっても、集光用レンズ105を含む光学系の開口数を大きくする調節が可能となる。これを図39及び図40を用いて説明する。

【0106】図39は、ビームエキスパンダ501が配置されていない場合の集光用レンズ105によるレーザ光Lの集光を示す図である。一方、図40は、ビームエキスパンダ501が配置されている場合の集光用レンズ105によるレーザ光Lの集光を示す図である。図39及び図40を比較すれば分かるように、ビームエキスパンダ501が配置されていない場合の集光用レンズ105を含む光学系の開口数を基準にすると、第2例では開口数が大きくなるように調節することができる。

【0107】[第3例]次に、本実施形態の第3例についてこれまでの例との相違を中心に説明する。図41はこのレーザ加工装置600の概略構成図である。レーザ加工装置600の構成要素のうち、これまでの例に係るレーザ加工装置の構成要素と同一要素については同一符号を付すことによりその説明を省略する。

【0108】レーザ加工装置600は、ビームエキスパンダ501の代わりに、ダイクロイックミラー103と集光用レンズ105との間のレーザ光Lの光軸上に虹彩絞り601が配置されている。虹彩絞り601の開口の大きさを変えることにより集光用レンズ105の有効径を調節する。虹彩絞り601は開口数調節手段の一例である。また、レーザ加工装置600は虹彩絞り601の開口の大きさを変える制御をする虹彩絞り制御部603

より制御される。

【0109】レーザ加工装置600の動作がこれまでの例のレーザ加工装置の動作と異なる点は、全体制御部127に入力された開口数の大きさに基づく開口数の調節である。レーザ加工装置600は入力された開口数の大きさに基づいて虹彩絞り601の開口の大きさを変えることにより、集光用レンズ105の有効径の縮小する調節をする。これにより、集光用レンズ105が1つであっても、集光用レンズ105を含む光学系の開口数を小さくするように調節することができる。これを図42及び図43を用いて説明する。

【0110】図42は、虹彩絞り601が配置されていない場合の集光用レンズ105によるレーザ光Lの集光を示す図である。一方、図43は、虹彩絞り601が配置されている場合の集光用レンズ105によるレーザ光Lの集光を示す図である。図42及び図43を比較すれば分かるように、虹彩絞り601が配置されていない場合の集光用レンズ105を含む光学系の開口数を基準にすると、第3例では開口数が小さくするように調節することができる。

【0111】次に、本実施形態の変形例を説明する。図44は本実施形態のレーザ加工装置の変形例に備えられる全体制御部127のブロック図である。全体制御部127はパワー選択部417及び相関関係記憶部413を備える。相関関係記憶部413には、図35に示す相関関係のデータが予め記憶されている。レーザ加工装置の操作者はキーボード等によりパワー選択部417に改質スポットの所望の寸法を入力する。改質スポットの寸法は、加工対象物の厚さや材質等を考慮して決定される。この入力により、パワー選択部417は相関関係記憶部413からこの寸法と同じ値の寸法に対応するパワーを選択し、そのパワーのデータをパワー調節部401に送る。よって、このパワーの大きさに調節されたレーザ加工装置でレーザ加工することにより、所望の寸法の改質スポットを形成することが可能となる。このパワーの大きさのデータはモニタ129にも送られ、パワーの大きさが表示される。この例では開口数が固定でパワーが可変となる。なお、入力された寸法と同じ値の寸法が相関関係記憶部413に記憶されていない場合、最も近い値の寸法に対応するパワーのデータがパワー調節部401及びモニタ129に送られる。これは以下に説明する変形例でも同様である。

【0112】図45は本実施形態のレーザ加工装置の他の変形例に備えられる全体制御部127のブロック図である。全体制御部127は開口数選択部419及び相関関係記憶部413を備える。図44の変形例と異なる点は、パワーではなく開口数が選択されることである。相関関係記憶部413には、図34に示すデータが予め記憶されている。レーザ加工装置の操作者はキーボード等

を入力する。これにより、開口数選択部419は、相関関係記憶部413からこの寸法と同じ値の寸法に対応する開口数を選択し、その開口数のデータをレンズ選択機構制御部405、ビームエキスパンダ501又は虹彩絞り制御部603に送る。よって、この開口数の大きさに調節されたレーザ加工装置でレーザ加工することにより、所望の寸法の改質スポットを形成することが可能となる。この開口数の大きさのデータはモニタ129にも送られ、開口数の大きさが表示される。この例ではパワーが固定で開口数が可変となる。

【0113】図46は本実施形態のレーザ加工装置のさらに他の変形例に備えられる全体制御部127のブロック図である。全体制御部127は組選択部421及び相関関係記憶部413を備える。図44及び図45の例と異なる点は、パワー及び開口数の両方が選択されることである。相関関係記憶部413には、図33のパワー及び開口数の組と寸法との相関関係のデータが予め記憶されている。レーザ加工装置の操作者はキーボード等により組選択部421に改質スポットの所望の寸法を入力する。これにより、組選択部421は、相関関係記憶部413からこの寸法と同じ値の寸法に対応するパワー及び開口数の組を選択する。選択された組のパワーのデータはパワー調節部401に送られる。一方、選択された組の開口数のデータはレンズ選択機構制御部405、ビームエキスパンダ501又は虹彩絞り制御部603に送られる。よって、この組のパワー及び開口数の大きさに調節されたレーザ加工装置でレーザ加工することにより、所望の寸法の改質スポットを形成することが可能となる。この組のパワー及び開口数の大きさのデータはモニタ129にも送られ、パワー及び開口数の大きさが表示される。

【0114】これらの変形例によれば、改質スポットの寸法を制御することができる。よって、改質スポットの寸法を小さくすることにより、加工対象物の切断予定ラインに沿って精密に切断でき、また平坦な切断面を得ることができる。加工対象物の厚みが大きい場合、改質スポットの寸法を大きくすることにより、加工対象物の切断が可能となる。

【0115】

【発明の効果】本発明に係るレーザ加工装置及びレーザ加工方法によれば、加工対象物の表面に熔融や切断予定ラインから外れた割れが生じることなく、加工対象物を切断することができる。よって、加工対象物を切断することにより作製される製品（例えば、半導体チップ、圧電デバイスチップ、液晶等の表示装置）の歩留まりや生産性を向上させることができる。

【0116】本発明に係るレーザ加工装置及びレーザ加工方法によれば、改質スポットの寸法を制御できる。このため、切断予定ラインに沿って精密に加工対象物を切

【0117】本発明に係るレーザ加工装置によれば、パワーの大きさ及び開口数の大きさのうち少なくともいずれか一つの入力に基づき、これらの条件で形成される改質スポットの寸法が表示手段に表示される。よって、レーザ加工前に改質スポットの寸法を知ることができる。

【0118】本発明に係るレーザ加工装置によれば、改質スポットの寸法の入力に基づき、改質スポットがこの寸法となるようにパワーの大きさ及び開口数の大きさのうち少なくともいずれか一つを調節する。よって、所望の寸法の改質スポットを形成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本実施形態に係るレーザ加工方法によってレーザ加工中の加工対象物の平面図である。

【図2】図1に示す加工対象物のII-II線に沿った断面図である。

【図3】本実施形態に係るレーザ加工方法によるレーザ加工後の加工対象物の平面図である。

【図4】図3に示す加工対象物のIV-IV線に沿った断面図である。

【図5】図3に示す加工対象物のV-V線に沿った断面図である。

【図6】本実施形態に係るレーザ加工方法によって切断された加工対象物の平面図である。

【図7】本実施形態に係るレーザ加工方法における電界強度とクラックの大きさとの関係を示すグラフである。

【図8】本実施形態に係るレーザ加工方法の第1工程における加工対象物の断面図である。

【図9】本実施形態に係るレーザ加工方法の第2工程における加工対象物の断面図である。

【図10】本実施形態に係るレーザ加工方法の第3工程における加工対象物の断面図である。

【図11】本実施形態に係るレーザ加工方法の第4工程における加工対象物の断面図である。

【図12】本実施形態に係るレーザ加工方法により切断されたシリコンウェハの一部における断面の写真を表した図である。

【図13】本実施形態に係るレーザ加工方法におけるレーザ光の波長とシリコン基板の内部の透過率との関係を示すグラフである。

【図14】本実施形態に係るレーザ加工方法を用いてクラックスポットを比較的大きく形成した場合の加工対象物の平面図である。

【図15】図14に示す切断予定ライン上のXV-XVに沿って切断した断面図である。

【図16】図14に示す切断予定ラインと直交するXVI-XVIに沿って切断した断面図である。

【図17】図14に示す切断予定ラインと直交するXVII-XVIIに沿って切断した断面図である。

【図18】図14に示す切断予定ラインと直交するXVII

【図19】図14に示す加工対象物を切断予定ラインに沿って切断した平面図である。

【図20】本実施形態に係るレーザ加工方法を用いてクラックスポットを比較的小さく形成した場合の切断予定ラインに沿った加工対象物の断面図である。

【図21】図20に示す加工対象物を切断予定ラインに沿って切断した平面図である。

【図22】所定の開口数の集光用レンズを用いてパルスレーザ光が加工対象物の内部に集光されている状態を示す加工対象物の断面図である。

【図23】図22に示すレーザ光の照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポットを含む加工対象物の断面図である。

【図24】図22に示す例より大きい開口数の集光用レンズを用いた場合の加工対象物の断面図である。

【図25】図24に示すレーザ光の照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポットを含む加工対象物の断面図である。

【図26】図22に示す例より小さいパワーのパルスレーザ光を用いた場合の加工対象物の断面図である。

【図27】図26に示すレーザ光の照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポットを含む加工対象物の断面図である。

【図28】図24に示す例より小さいパワーのパルスレーザ光を用いた場合の加工対象物の断面図である。

【図29】図28に示すレーザ光の照射による多光子吸収が原因で形成されたクラックスポットを含む加工対象物の断面図である。

【図30】図21に示す切断予定ラインと直交するXXX-XXXに沿って切断した断面図である。

【図31】本実施形態の第1例に係るレーザ加工装置の概略構成図である。

【図32】本実施形態に係るレーザ加工装置に備えられる全体制御部の一例の一部分を示すブロック図である。

【図33】本実施形態に係るレーザ加工装置の全体制御部に含まれる相関関係記憶部のテーブルの一例を示す図である。

【図34】本実施形態に係るレーザ加工装置の全体制御部に含まれる相関関係記憶部のテーブルの他の例を示す図である。

【図35】本実施形態に係るレーザ加工装置の全体制御部に含まれる相関関係記憶部のテーブルのさらに他の例を示す図である。

【図36】本実施形態の第1例に係るレーザ加工方法を説明するためのフローチャートである。

【図37】本実施形態の第1例に係るレーザ加工方法により切断可能なパターンを説明するための加工対象物の平面図である。

【図38】本実施形態の第2例に係るレーザ加工装置の

【図39】ビームエキスパンダが配置されていない場合の集光用レンズによるレーザ光の集光を示す図である。

【図40】ビームエキスパンダが配置されている場合の集光用レンズによるレーザ光の集光を示す図である。

【図41】本実施形態の第3例に係るレーザ加工装置の概略構成図である。

【図42】虹彩絞りが配置されていない場合の集光用レンズによるレーザ光の集光を示す図である。

【図43】虹彩絞りが配置されている場合の集光用レンズによるレーザ光の集光を示す図である。

【図44】本実施形態のレーザ加工装置の変形例に備えられる全体制御部の一例のブロック図である。

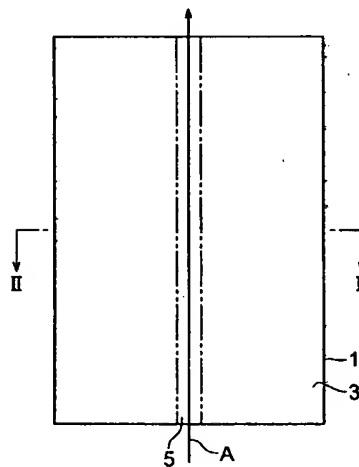
【図45】本実施形態のレーザ加工装置の変形例に備えられる全体制御部の他の例のブロック図である。

【図46】本実施形態のレーザ加工装置の変形例に備えられる全体制御部のさらに他の例のブロック図である。

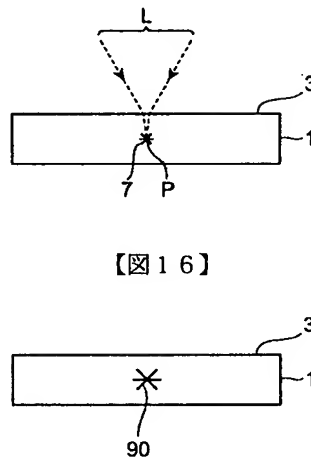
【符号の説明】

1・・・加工対象物、3・・・表面、5・・・切断予定ライン、7・・・改質領域、9・・・クラック領域、11・・・シリコンウェハ、13・・・溶融処理領域、41・・・領域、43・・・切断面、90・・・クラックスポット、101・・・レーザ光源、105、105a、105b、105c・・・集光用レンズ、109・・・X軸ステージ、111・・・Y軸ステージ、113・・・Z軸ステージ、400・・・レーザ加工装置、401・・・パワー調節部、403・・・レンズ選択機構、411・・・寸法選択部、413・・・相関関係記憶部、415・・・画像作成部、417・・・パワー選択部、419・・・開口数選択部、421・・・組選択部、500・・・レーザ加工装置、501・・・ビームエキスパンダ、600・・・レーザ加工装置、601・・・虹彩絞り、P・・・集光点

【図1】

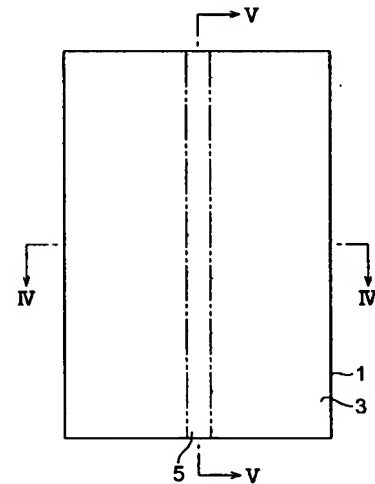


【図2】

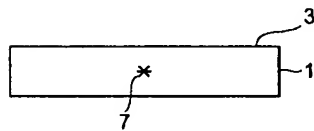


【図16】

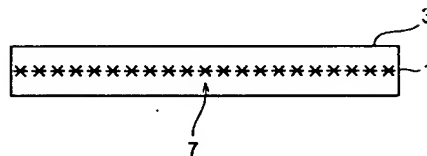
【図3】



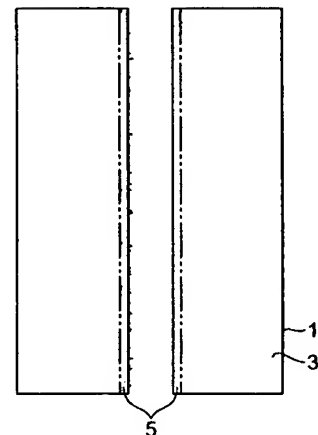
【図4】



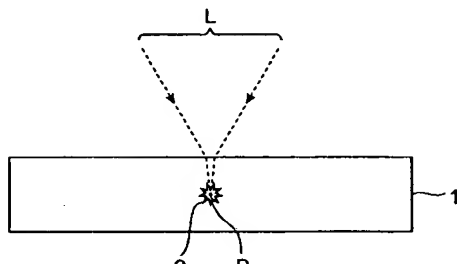
【図5】



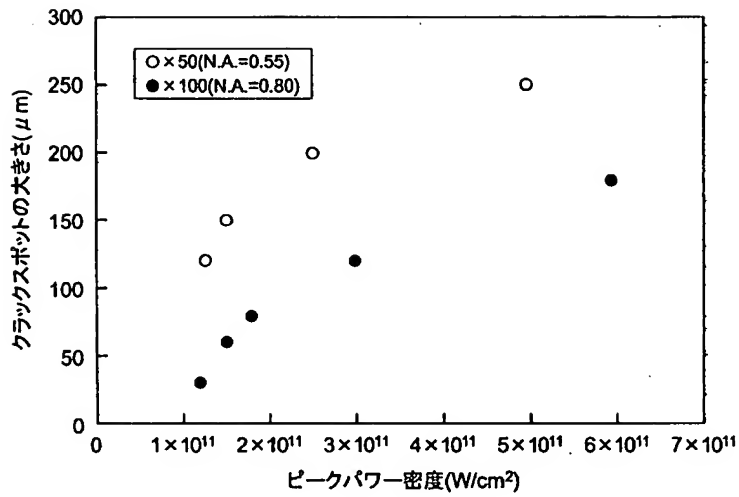
【図6】



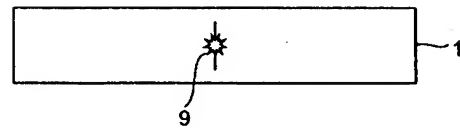
【図8】



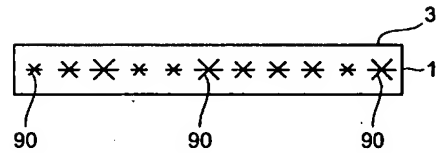
【図7】



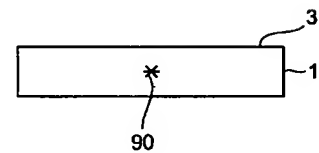
【図9】



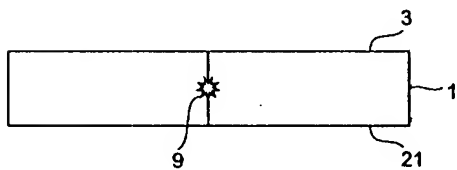
【図15】



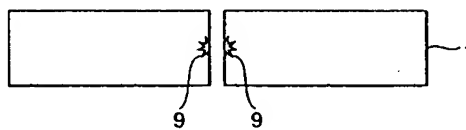
【図17】



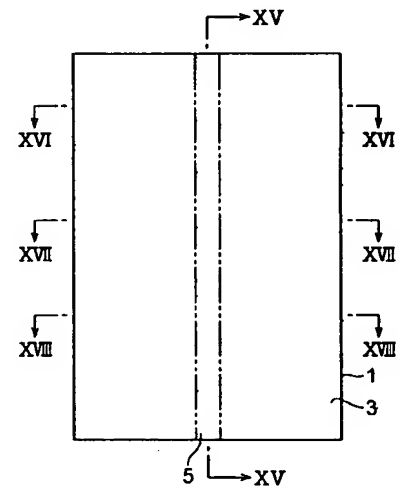
【図10】



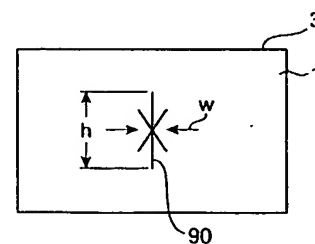
【図11】



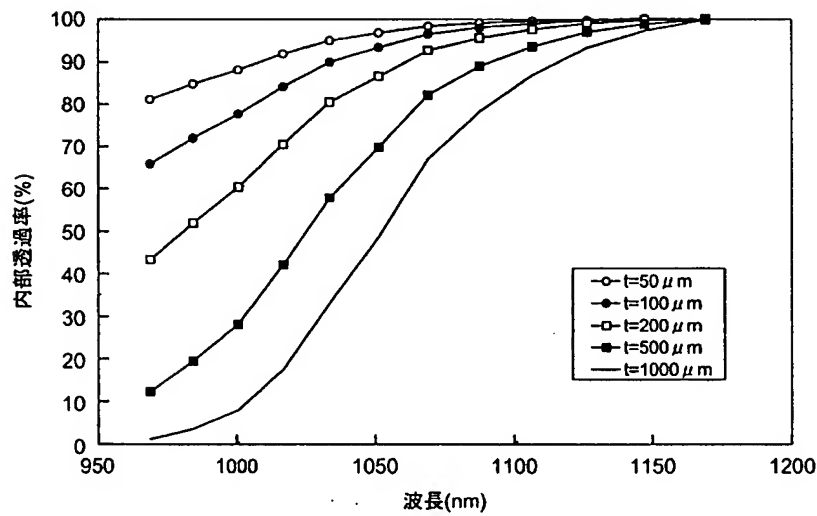
【図14】



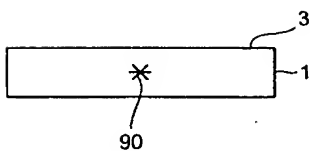
【図23】



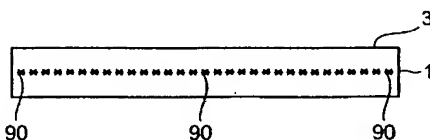
【図13】



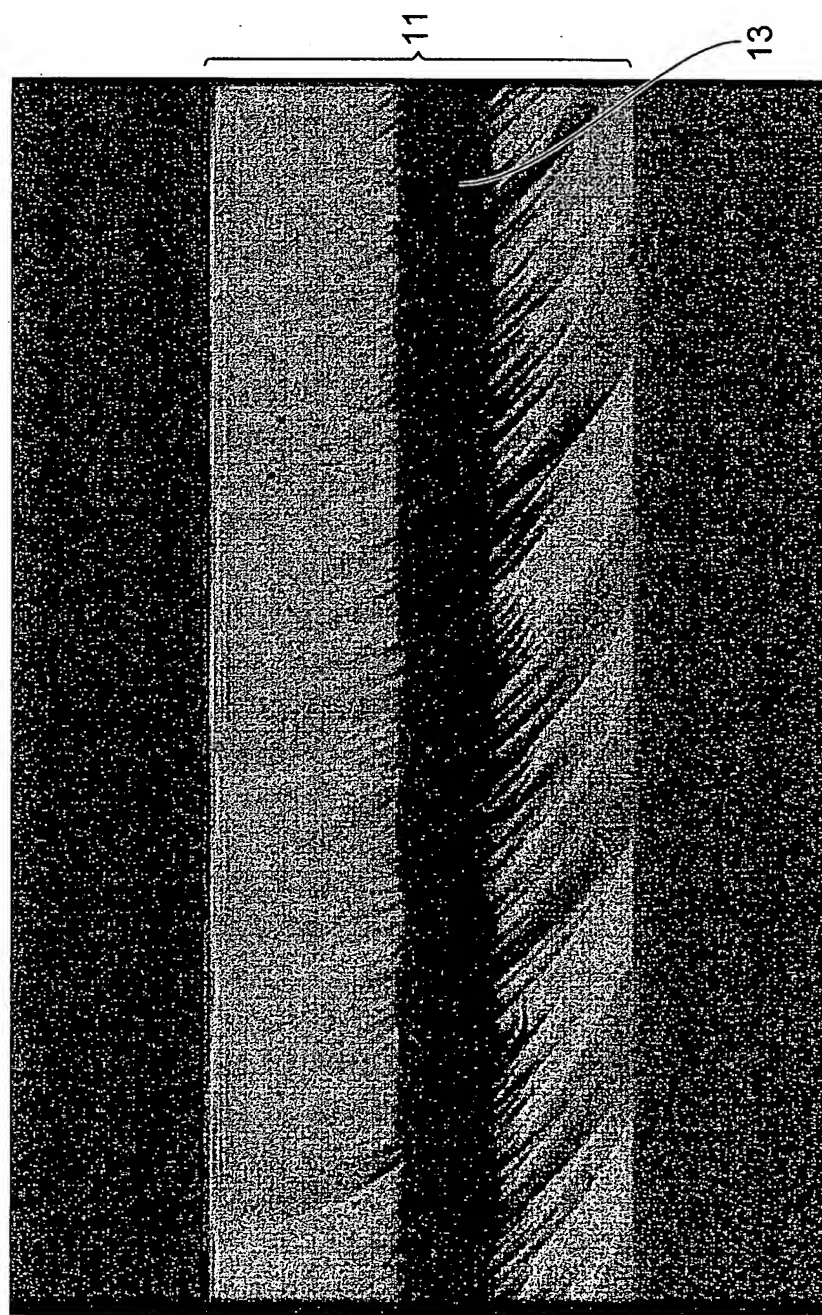
【図18】



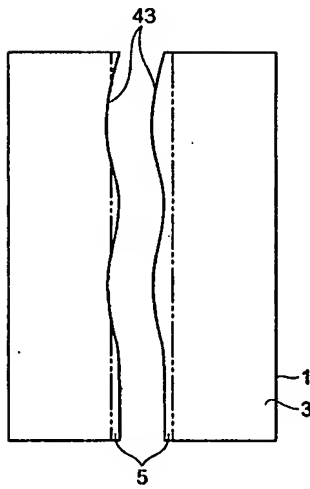
【図20】



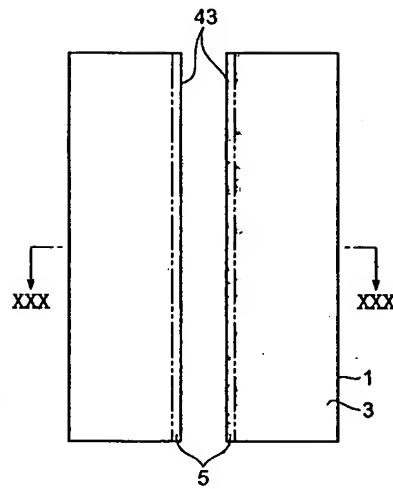
【図12】



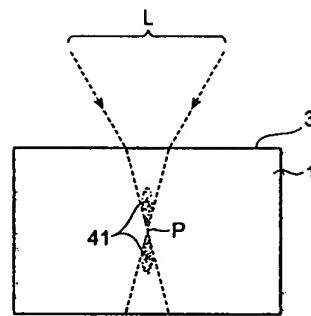
【図19】



【図21】



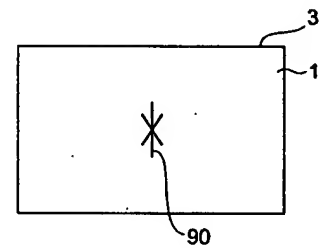
【図22】



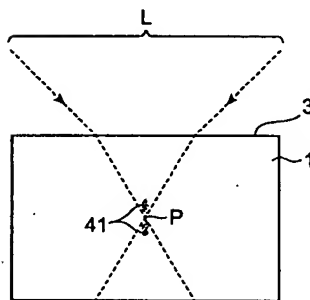
【図34】

開口数	寸法(μm)
0.55	150
0.8	60

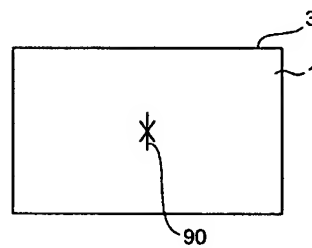
【図27】



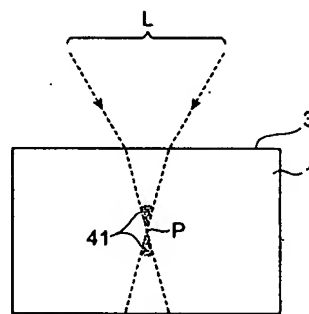
【図24】



【図25】



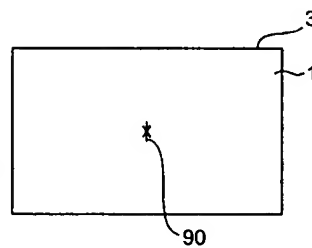
【図26】



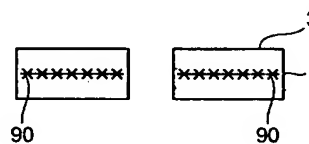
【図35】

パワー密度(W/cm ²)	寸法(μm)
1.19×10^{11}	30
1.49×10^{11}	60
1.79×10^{11}	80
2.98×10^{11}	120
5.96×10^{11}	180

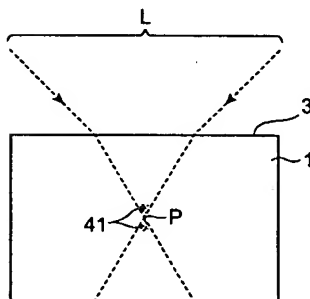
【図29】



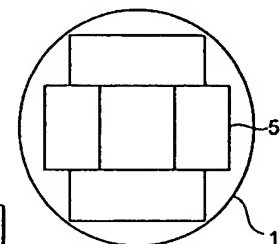
【図30】



【図28】



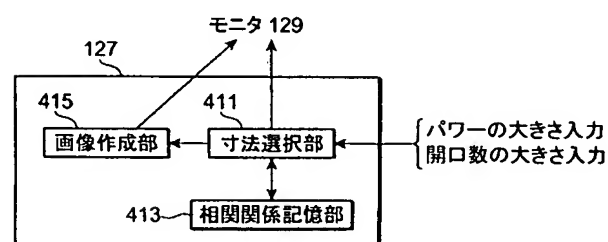
【図37】



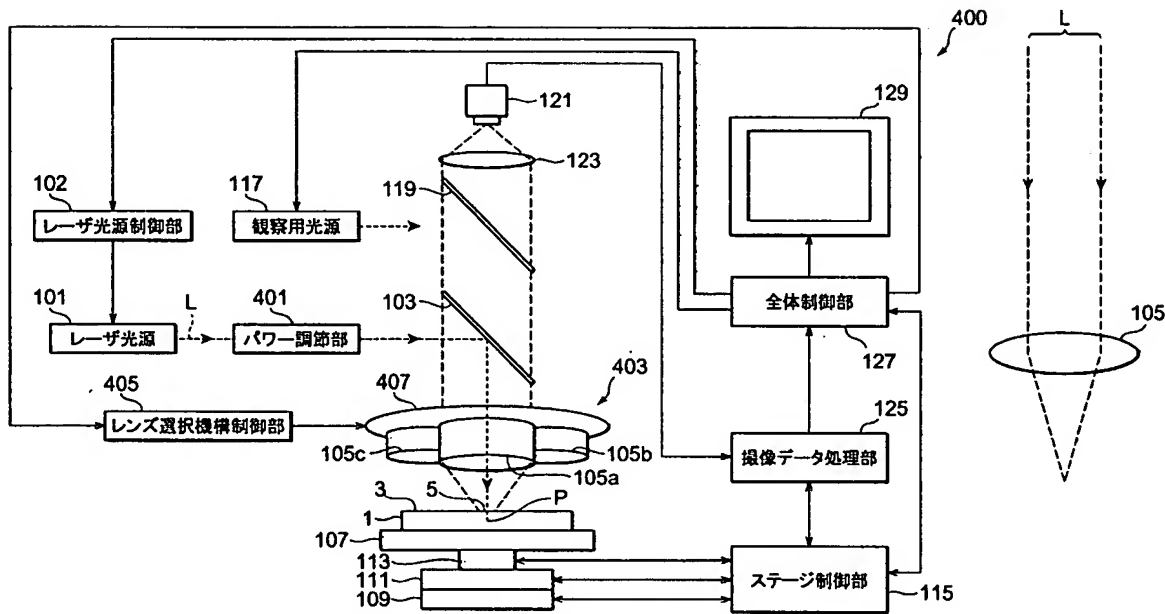
【図33】

組		寸法(μm)
パワー密度(W/cm ²)	開口数	
1.24×10^{11}	0.55	120
1.49×10^{11}	0.55	150
1.19×10^{11}	0.8	30
1.49×10^{11}	0.8	60

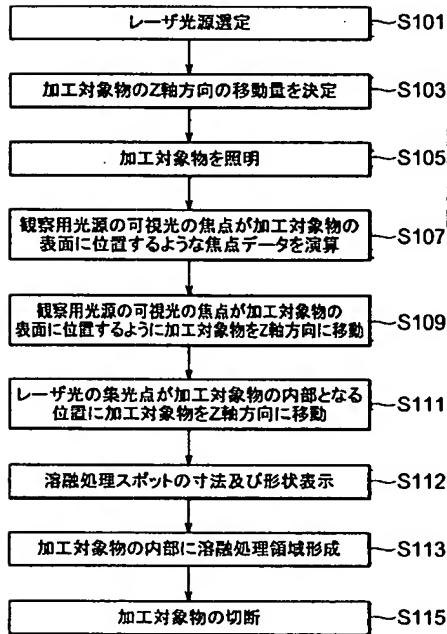
【図32】



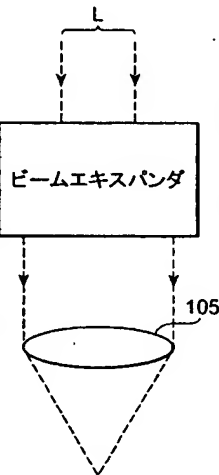
【図31】



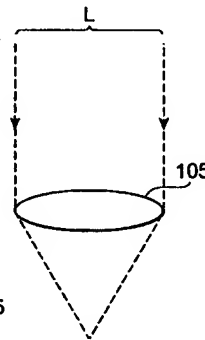
【図36】



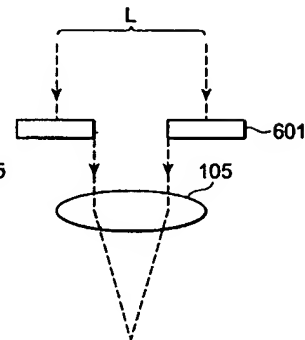
【図40】



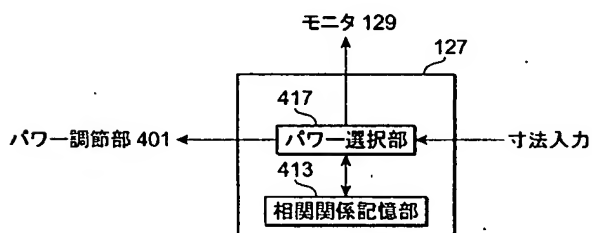
【図42】



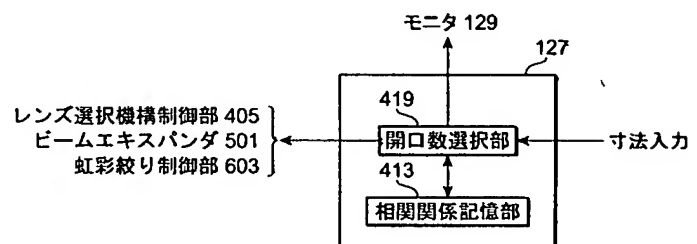
【図43】



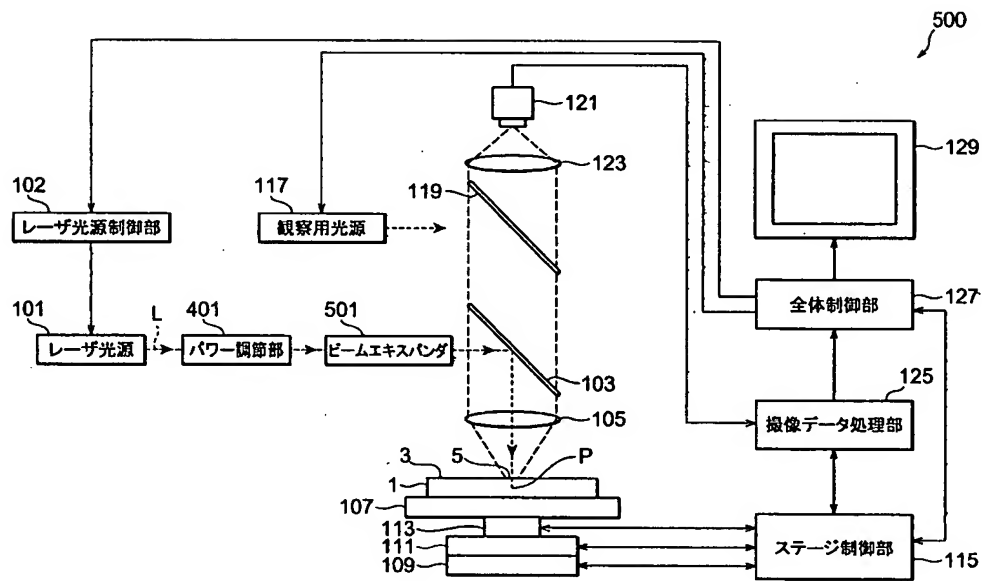
【図44】



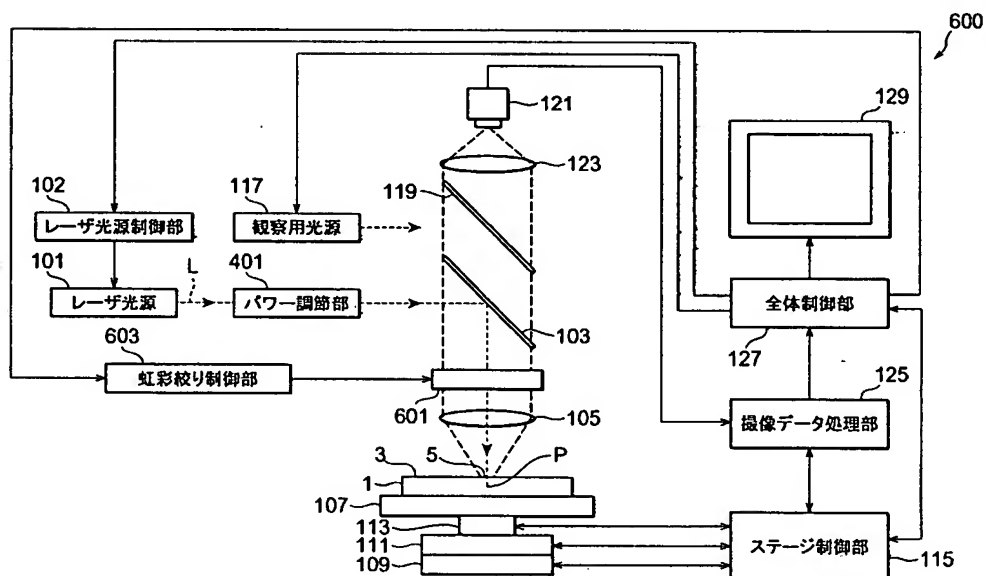
【図45】



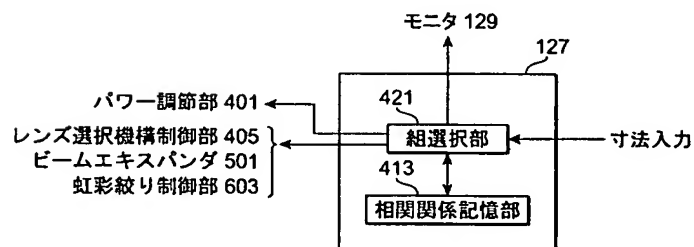
【図38】



【図41】



【図46】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. ⁷	識別記号	F I	ターム (参考)
B 2 3 K 26/06		B 2 3 K 26/06	Z
C 0 3 B 33/08		C 0 3 B 33/08	
(72) 発明者 内山 直己		F ターム (参考)	4E068 AE01 CA02 CA03 CA11 CB05
静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ			CC02 CD13 DA11 DB10 DB12
トニクス株式会社内			DB13
(72) 発明者 和久田 敏光			4G015 FA06 FB02 FB03 FC02 FC10
静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ			FC14
トニクス株式会社内			